



宇宙系列

The Great
Beyond

伟大的超越

[美] 保罗·哈尔彭 / 著 刘 政 / 译



第一推动

湖南科学技术出版社

The Great Beyond

Copyright © 2004 by Paul Halpern

湖南科学技术出版社通过美国 Anderson Literary Inc. 独家获得本书
中文简体版中国大陆地区出版发行权。

著作权合同登记号：18—2006—003

图书在版编目 (CIP) 数据

伟大的超越 / (美) 保罗·哈尔彭著; 刘政译. —长沙:
湖南科学技术出版社, 2008.4

(第一推动丛书)

书名原文: The Great Beyond

ISBN 978-7-5357-5159-1

I. 伟… II. ①哈…②刘… III. 宇宙—普及读物 IV. P159

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 049994 号

第一推动丛书 宇宙系列

伟大的超越

著 者: [美] 保罗·哈尔彭

译 者: 刘 政

责任编辑: 吴 炜 戴 涛

出版发行: 湖南科学技术出版社

社 址: 长沙市湘雅路 276 号

<http://www.hnstp.com>

邮购联系: 本社直销科 0731-4375808

印 刷: 长沙化勘印刷有限公司

(印装质量问题请直接与本厂联系)

厂 址: 长沙市青园路 4 号

邮 编: 410004

出版日期: 2008 年 4 月第 1 版第 1 次

开 本: 880mm×1230mm 1/32

印 张: 13.75

字 数: 277000

书 号: ISBN 978-7-5357-5159-1

定 价: 32.00 元

(版权所有·翻印必究)

献给 Michael Erlich 和 Frederick Schuepfer，以此纪念他
们的伟大友谊和多年来的启迪。

非欧几何的微积分与量子物理足够撑开我们的大脑；人们把它们与民间传说混为一谈，并依傍炉角，希望将多维现实的奇异背景，追溯到食尸鬼式的暗示或者哥特式的故事中；不过，如果这样，他们将很难希冀从精神的桎梏中解放。

——拉夫克洛夫特 (H. P. LOVECRAFT)，
《女巫房间中的梦》(1933)

总 序

科学，特别是自然科学，最重要的目标之一，就是追寻科学本身的原动力，或曰追寻其第一推动。同时，科学的这种追求精神本身，又成为社会发展和人类进步的一种最基本的推动。

科学总是寻求发现和了解客观世界的新现象，研究和掌握新规律，总是在不懈地追求真理。科学是认真的、严谨的、实事求是的，同时，科学又是创造的。科学的最基本态度之一就是疑问，科学的最基本精神之一就是批判。

的确，科学活动，特别是自然科学活动，比较起其他的人类活动来，其最基本特征就是不断进步。哪怕在其他方面倒退的时候，科学却总是进步着，即使是缓慢而艰难地进步，这表明，自然科学活动中包含着人类的最进步因素。

正是在这个意义上，科学堪称为人类进步的“第一推动”。

科学教育，特别是自然科学的教育，是提高人们素质的重



要因素，是现代教育的一个核心。科学教育不仅使人获得生活和工作所需的知识和技能，更重要的是使人获得科学思想、科学精神、科学态度以及科学方法的熏陶和培养，使人获得非生物本能的智慧，获得非与生俱来的灵魂。可以这样说，没有科学的“教育”，只是培养信仰，而不是教育。没有受过科学教育的人，只能称为受过训练，而非受过教育。

正是在这个意义上，科学堪称为使人进化为现代人的“第一推动”。

近百年来，无数仁人志士意识到，强国富民再造中国离不开科学技术，他们为摆脱愚昧与无知作了艰苦卓绝的奋斗。中国的科学先贤们代代相传，不遗余力地为中国的进步献身于科学启蒙运动，以图完成国人的强国梦。然而应该说，这个目标远未达到。今日的中国需要新的科学启蒙，需要现代科学教育。只有全社会的人具备较高的科学素质，以科学的精神和思想、科学的态度和方法作为探讨和解决各类问题的共同基础和出发点，社会才能更好地向前发展和进步。因此，中国的进步离不开科学，是毋庸置疑的。

正是在这个意义上，似乎可以说，科学已被公认是中国进步所必不可少的推动。

然而，这并不意味着，科学的精神也同样地被公认和接受。虽然，科学已渗透到社会的各个领域和层面，科学的价值和地位也更高了，但是毋庸讳言，在一定的范围内，或某些特定时候，人们只是承认“科学是有用的”，只停留在对科学所带来的后果的接受和承认，而不是对科学的原动力、科学的精神的接受和承认。此种现象的存在也是不能忽视的。

科学的精神之一，是它自身就是自身的“第一推动”。也就是说，科学活动在原则上是不隶属于服务于神学的，不隶属于服务于儒学的，科学活动在原则上也不隶属于服务于任何哲学。科学是超越宗教差别的，超越民族差别的，超越党派差别的，超越文化的地域的差别的，科学是普适的、独立的，它自身就是自身的主宰。

湖南科学技术出版社精选了一批关于科学思想和科学精神的世界名著，请有关学者译成中文出版，其目的就是为了传播科学的精神，科学的思想，特别是自然科学的精神和思想，从而起到倡导科学精神，推动科技发展，对全民进行新的科学启蒙和科学教育的作用，为中国的进步作一点推动。丛书定名为《第一推动》，当然并非说其中每一册都是第一推动，但是可以肯定，蕴涵在每一册中的科学的内容、观点、思想和精神，都会使你或多或少地更接近第一推动，或多或少地发现，自身如何成为自身的主宰。

《第一推动丛书》编委会

序 言 | 卡鲁扎-克莱因奇迹

你的理论在形式上的统一让人震惊。

——阿尔伯特·爱因斯坦致西奥多·卡鲁扎

(Theodor Kaluza) 的信，1919

这是优雅的思想，在深刻的数学车床上被琢磨；这亦是基本的思想——激起人们的狂欢，也带来嘲弄；这也是经久不衰的思想，比两次世界大战持续得更长，并且与 20 世纪的科学盘根错节纠缠不清；这还是令人倾心的思想：它认为自然被额外维度^①包裹，看上去几乎完美。多么迷人的观点！

虽然欢庆过成功，背负过挫折，遭遇过误解，忍受过冷遇，但是，超越时空的高维已经成为现代物理的根本特点。如果它成功了，就意味着我们感知的世界不过是更加宏大的无形世界的小部分。长度、宽度、高度和时间将被补充到看不见的

^① “Dimention”，根据上下文或译为“维度”或者“维数”，前者偏于物理语言，后者接近数学语言（本书脚注除非说明，都是译者所加）。



方向上，我们的知觉以外。

科学界向来谨慎。它抗拒变革，除非论辩直刺骨髓。动人的数学观点，若身处抽象的思考阶段，就难以挥舞大斧，将其镌刻于人们心中。为了证明超越我们熟知的世界的存在，需要严格的物理验证。当前的理论学家逐渐显现出对额外维度的兴趣，因为他们感觉到踏出这样大胆的一步，是把所有自然力统一为单一的、丰富的表达的最好的（也可能是唯一的）方法。

2 科学已经揭示了四种基本的自然力。对它们理解最好的就是电磁力。19 世纪，物理学家麦克斯韦（James Clerk Maxwell）成功地建立模型，通过一组简单的方程描述了它们的行为。在最小范围内，人们利用量子电动力学理论（quantum electrodynamics, QED）充分探索了它的性质。QED 让人们可以在人们认知的所有范围内理解电磁过程，从热碰撞的大致图景、带电粒子到超低温超导体的磁性质。

引力，是另外一种基本力。牛顿（Isaac Newton）于 17 世纪就已经对它进行了著名的描述。接着，到了 20 世纪，爱因斯坦广义相对论按照时空的几何性质重新解释了引力。但是，与电磁力不同，引力在微小的尺度上几乎无法理解。还没有成功的引力理论包容量子原理，而众所周知，后者支配了原子和亚原子的行为。量子引力理论的发展，比如 QED 威力无穷的预言的成功，让它成为物理学关注的目标。

弱相互作用力最先由于 1896 年亨利·贝克勒尔（Henri Becquerel）发现放射性衰变而被了解。不过，直到 20 世纪中叶，人们才将它与其他力区分开。慢慢的，物理学家意识到，一种被称作 β 衰变的原子核转变，即中子分裂为质子、电子和

中微子，只能通过新的力来解释。于是，与其他力相区别，它被称为弱相互作用力（也被人叫做原子核力）。此外，有一种力有足够的力量，能够抵消质子受到的排斥力，让它们紧紧地束缚到一起。就像电荷之间存在排斥，一定有什么东西让他们保持在一起，这就是强力。

因为强力作用于亚原子尺度，研究人员认识到，它的影响只有通过量子理论理解。在过去的数十年内，科学家已经提出了强力的微观描述，称为量子色动力学（quantum chromodynamics, QCD），获得了一些成功。QCD 中的计算比 QED 复杂得多，限制了科学家检验所有的理论结果。³

四种自然力就像固执的弟兄，个个特立独行。引力，体现粒子运动空间的扭曲，影响一切物质。电磁力相反，只关心带电物体，比如带正电的质子和带负电的电子；而中性物体，比如中微子和中子，就好比繁忙的高速公路上的幽灵，在浩瀚的电磁场中我行我素，目空一切。而强力更任性，它排斥了一整类粒子——轻子（leptons），而仅仅拥抱另外一个群体——重子（hadrons）；轻子包括电子、中微子和质量更大的 μ 介子与 τ 介子；重子有质子、中子等许多粒子，它们由更基本的结构夸克组成。最后，弱相互作用力仅仅参与了有限的一类粒子变换，例如 β 衰变。

此外，这四种力的力程与大小截然不同。电磁力和引力在大距离上比较有效，力的大小随距离的衰减比其他两种力小。这就是为何一枚指南针可以检测远在千里之遥的地球磁极，为



何海洋受它与月亮之间引力的影响^①。而强力和弱力的作用范围就极其有限——也几乎只存在于原子核的范围内。两个质子，如果距离四分之一英寸，几乎感受不到任何强作用吸引力，只存在力量巨大的电荷排斥力。如果违背它们的意愿，靠近到原来的一万亿倍以上，它们将感受到强力的吸引。这就是为什么只有在高压条件下，才能将质子和中子束缚到一起，发生核聚变，比如在太阳中心。巨大的压力让粒子相互靠近，让它们感受到强力，紧紧地粘住。

一旦两个粒子离得足够近，强相互作用力会将它们胶合，以无法想象的巨大力量牢牢束缚。短程的强相互作用力，是所有力中最强大的，它的力量比电磁力更大。因为原子核被强力牢固地拴住，电磁力就像它脸上的沙子一样。这就是为何最普通的原子核，从氢原子到铁原子如此稳定的原因。

到目前为止，威力最小的力，当属引力。在一场宇宙体育竞赛中，它甚至都没有办法得分；即使是对强力和电磁力唯唯诺诺的弱力，都能把引力一脚踩得气若游丝。引力要比其他任何力小一百亿亿亿亿倍。拿引力和电磁力的大小举个例子，一块条形磁铁的磁力，可以轻易地克服整个地球的引力让一些曲别针脱离地面。引力比其他力弱得多的困难被称为“等级问题”（hierarchy problem）。

毫无疑问，这四种力是古怪的弟兄。然而，大多数物理学家坚信，它们出生门第相同。在它们诞生之初，在宇宙炽热的那一刹那，它们看上去面貌无异。各个力的力程、大小以及与

^① 即潮汐的主要起因。

其他力的相互作用都一样。不过，因为某种原因，随着时间流逝环境变化，各种力分道扬镳，性质殊异。当宇宙慢慢冷却，这些迥然不同的属性被固定下来，就像寒窗上不同形状的冰花。科学已经证明四种自然力中两种力的兄弟情谊。20 世纪 60 年代，物理学家温伯格（Steven Weinberg）和萨拉姆（Adbus Salam，他拓展了格拉肖的工作）发展了电磁力和弱力的统一的解释，即著名的弱电模型。

理论家热衷于创造出包容万象的“万有理论”，能够囊括所有的四种力。虽然引力与其他力显著不同，但物理学家努力提高观测的极限，要将它涵盖进去。强相互作用力和弱相互作用力有可能同时居住在类似于温伯格和萨拉姆搭建的房子里。但是引力却与众不同，它存在于庞大的扩展空间中，一个高维的宇宙。

通过超空间（超过三维的空间维度）统一自然力的想法被称为卡鲁扎-克莱因奇迹。这个称呼源自 20 世纪最初 10 年到 20 年代它的创始者：德国数学家西奥多·卡鲁扎和瑞典物理学家奥斯卡·克莱因（Oskar Klein）。这个理论最初只是应用于电磁力与引力的统一；其他两种力当时还不为人知。最近数十年内，这个模型被人们推广，意在包括余下的作用力，现在与此有关的文章和讨论数不尽数。单单就这几年，理论物理界对各种卡鲁扎-克莱因方法的引用高居榜首。杰出的理论家加里（Gary Gibbons）写道，“那些从事过卡鲁扎和克莱因理论的人，没有人能够忘记它萦绕于心的数学上的美丽，尽管它在实验上有所局限……它基本的观点目前正统领着将引力与电磁力、弱力和强力统一的所有尝试。”¹



当西奥多·卡鲁扎在哥尼斯堡大学做无薪大学教师这种低微的工作时，他的脑海闪现出高维统一的念头。那个时候的德国，按照地位而言，无薪大学教师和教授相比，就好像拙劣的替补演员与好莱坞数一数二的明星。无薪教师的收入，来自上课的学生所缴部分费用，以及帮助教授做事的报酬。但是和教授不一样，他们既没办公室，也没有声望。如果一个无薪教师太不幸或者不受瞩目，没有学生上他的课，而他也没有其他收入，那他一定会饿死。尽管如此，在这样恶劣的条件下，卡鲁扎依然保持着杰出的创造力。

一天，卡鲁扎正在家里学习，他在考虑爱因斯坦广义相对论的变化形式——那时相对论还是一个新事物。他九岁的孩子坐在房间的另外一边，当卡鲁扎工作的时候，孩子就看着他，这令卡鲁扎稍感慰藉。卡鲁扎原本认为以五维宇宙假设的形式重写爱因斯坦的方程会很有趣，就和拉威尔（Ravel）的感觉一样——拉威尔曾经觉得重新创作一遍穆索尔斯基（Mussorgsky）^① 的《图画展览会》非常吸引人，拉威尔以管弦乐团合奏的形式代替了钢琴独奏。额外的元素能够揭示相对论什么新的特点呢？卡鲁扎想知道。

突然，卡鲁扎灵感乍现。加入一个额外维度后，他发现他重新构建的方程不仅仅包含了爱因斯坦的引力理论，同时还有麦克斯韦的电磁理论。让他儿子诧异的是，那刻他似乎被冻住了一动不动，转瞬间他突然起身，接着发出他特有的“尤里

^① 穆索尔斯基，莫杰斯特·彼得罗维奇（1839~1881）：俄国作曲家，其作品包括戏剧《鲍里斯·戈东诺夫》和钢琴曲《图画展览会》（两者都作于1874年）。

卡”(eureka)^① 叫声——哼莫扎特的曲子。

卡鲁扎异常兴奋。他相信他已经找到通往将自然界统一起来的钥匙。他把发现递交给爱因斯坦，那时的爱因斯坦是一家德国期刊编辑，颇具声望。爱因斯坦最开始为这个观点欣喜，不过疑虑接着就来了。他将这篇文章搁置了两年，其间向卡鲁扎提出了若干建议。不过最终他认为它太重要了，应该让世人知晓，于是他于 1921 年将其发表。

三年后，一位并不熟悉卡鲁扎文章的人奥斯卡·克莱因，也独立地提出了相同的观点。那时，克莱因正在密歇根大学工作，教授基础物理。作为研究项目的一部分，他正在考查粒子在场中的运动。场提供了整个空间中，粒子在给定点所受力的方向和方向的信息。它给出特定的力对粒子的作用的大小。克莱因研究了带电粒子同时处在电磁场和引力场的影响下，是如何运动的。当他将要完成这项研究时，他意识到他可以用单独的一组四维方程，将电磁力和引力都包括进去。

克莱因的女婿，物理学家斯坦利·狄塞 (Stanley Deser)，喜欢这样打趣克莱因的工作，“我一直在说他发明卡鲁扎-克莱因理论是为了减轻教学负担……他不想下个学期同时教电磁学和引力，因此他创立了卡鲁扎-克莱因理论。”²

即使克莱因是理论的“重新发现者”，他依然与人共享这份荣耀，因为他已经让那个概念烙上自己的印记。克莱因回到欧洲后，他把自己的工作给沃尔夫冈·泡利 (Wolfgang Pauli)

^① 希腊语“我找到了!”，“我搞清楚了!”源自希腊数学家和发明家阿基米德发现测量不规则固体体积的方法，并以此发现测定金子纯度的方法时的惊呼。



看。泡利告诉他，卡鲁扎已经发表这方面的文章。克莱因一开始痛不欲生，从打击中恢复过来后，他决定无论如何发表自己的工作，并在文章中强调在量子理论框架下对第五维的新颖解释。按照克莱因的观点，第五维紧紧地卷曲成环，就像线绕在轴上。它的长度依赖若干自然常数，包括电子电荷、光速、万有引力常数和普朗克常量（它决定了量子现象的尺度）。克莱因计算了这个长度的值，发现是一个非常小的数，超出了测量的限度。由此，他发现了一个物理的方法，描述第五个维度，并证明它无法检测。所以，各种力在高维的统一就成为众所周知的卡鲁扎-克莱因理论。

鉴于这个理论的重要性，人们可能会认为它的提出者会毕其一生专攻于此。但是，事与愿违。很讽刺的是，当卡鲁扎发表了一篇简短的文章后，就再也没有出过这方面的其他文章。克莱因写过几篇文章，不过后来就与泡利一道，对理论的态度发生转变，最后竟为他自己理论的终结而欢呼起来。随着时间流逝，量子理论的不断进展让他相信，第五维不再成功。更后来，克莱因对五维理论重燃兴趣，又在上面花了一些时间并提出新颖的解释。不过，至少在有生之年，他因为物理学其他方面的贡献，为人熟知。20 世纪 70 年代末到 80 年代，正当他的理论经历伟大的复兴之际，他不幸溘然长逝。

最近数十年，科学史家逐渐意识到，就像新大陆的发现一样，还有一个“Leif Eriksson”^①，在几次著名的航行之前，他

^① 根据资料记载，一个叫 Leif Eriksson 的斯堪的纳维亚人于公元 1000 年从格陵兰岛起航开始航行，并到达了北美洲的东北岸，这比哥伦布早了 500 年。

便已经横跨海洋。事实证明，卡鲁扎和克莱因并非第一批在高维世界留下足迹的人。诺德斯特朗（Gunnar Nordström），一位芬兰的物理学家，在他们之前就已经在那片土地插下旗帜。他的贡献完全被历史遗忘，直到 20 世纪 80 年代被人挖掘出来。为什么不能称“诺德斯特朗奇迹”？或许这也是为什么哥伦布能出现在所有的书籍中。诺德斯特朗的成就纤弱孤零零地出现在那个时代，基石并不牢固（他的理论基于有瑕疵的引力理论），而由卡鲁扎提出并经克莱因琢磨后的理论，却启发了一大批的后继者，其中包括杰出的物理学家爱因斯坦。爱因斯坦后半生研究不同的统一场理论，涵盖了五维方法。

即使是伟大的爱因斯坦对额外维度的存在以及它们可能的样子，也会心存疑虑，反反复复。与流行的说法相反，爱因斯坦并非坚定不移的思想家，并非每次将想法写成文章，都能创造出坚不可摧的理论。正如科学史家派斯（Abraham Pais）和斯塔赫尔（John Stachel）恰如其分指出的，他的职业生涯充满了失败的尝试和令人震惊的突然的思想转变，以及言行不一的轶事。爱因斯坦的天才在于他与众不同的洞察力和坚忍不拔的毅力，这从他发表文章的质量可以看出来，特别是后期的文章。⁸

爱因斯坦五维观点的提出就像是一个爱吃甜食的节食者。最初，当卡鲁扎把原始的文章寄给他，爱因斯坦发现它迷人而充满魅力。接着，意识到存在额外的超自然的禁锢，他客气地将其暂时压下。整个 20 世纪 20 年代，他慢慢咀嚼这个理论的前提条件，不过仍然没有囫圇吞枣地全盘接受它的结论；而主要在精心烹制其他的统一方法——只包括空间、时间，再无他



在 1930 年克利福德·贝里曼 (Clifford Berryman) 的这幅卡通画中，爱因斯坦告诉议会，“我将把相对论和第四维坚持下去。”

物。在 20 世纪 30 年代初，爱因斯坦与他的助手沃尔特·迈耶 (Walther Mayer) 一道，发展出卡鲁扎-克莱因的“食物疗法”，能够保留卡鲁扎-克莱因方法的优点，而无需注重明确的额外维度。仅仅到了 20 世纪 30 年代末期，爱因斯坦才成为卡鲁扎-克莱因理论这份美食的品尝家，尽情享受这份美味佳肴。直到 20 世纪 40 年代，他才像一个暴饮暴食之人，并最终放弃了它。

对于无法看见的维度，爱因斯坦的不满情有可原，因为他

更加偏爱可以感知的、可以检验的自然理论。他和同时代的大部分科学家不屑超自然之事，但他不得不面对事实：那个时候，大多数流行读物都将高维与灵魂的世界联系起来。人们尝试过许多精确可靠的方法后，声称维度无法直接测量，这看上去是一种退步。不过，在他一生中的大部分时间，他情愿把对无法察觉的世界的厌恶搁置一旁，完成他的统一之梦。

这就是有关卡鲁扎、克莱因和爱因斯坦等许多人的故事。他们踏上了这片充满希望的领域，不过通过高维建立自然统一的观点却让人眼花缭乱。这从20世纪头10年就已经开始，这个时候量子物理和相对论还处于初期。神圣的墙壁已经轰然倒塌，那是一个革新的年代，几乎任何事情都有可能——一些思想家，他们掌管的领域超越时空的限制。随着统一模型系统化表达的出现——以超引力和超弦为开端，到目前的主角M理论和膜世界，这个故事愈发动人。那些模型并非假想五维，而是10个或者11个维度，它们将卡鲁扎-克莱因理论扩展到非凡的新领域。

最新的一些方法为人们在物理上检测额外维度提供了切实的可能性。检验卡鲁扎-克莱因理论奇迹般的假设，已经成为实验物理一条振奋人心的大道。不久，我们可能知道是否存在超越我们所见维度的世界。

目 录

> 序言 卡鲁扎-克莱因奇迹	1
> 第 1 章 几何的威力	1
> 第 2 章 多维空间的景象	21
> 第 3 章 物理学家的里程碑——电、磁和光的 统一	65
> 第 4 章 完善引力	93
> 第 5 章 奏响第五根弦——卡鲁扎非凡的发现	113
> 第 6 章 克莱因的量子奥德赛	130
> 第 7 章 爱因斯坦的两难	162

> 第 8 章 被放逐的真理——在普林斯顿创建理论	186
> 第 9 章 美丽新世界——在灾祸连绵的年代追 寻统一	212
> 第 10 章 规范弱力和强力	246
> 第 11 章 被弦紧束的超空间包裹	277
> 第 12 章 膜世界与平行宇宙	319
> 总结 感知额外维数	347
> 注释	358
> 致谢	376
> 索引	380
> 译后记 超越之路	400

第 1 章 | 几何的威力

啊，可怜的人类，囿于八荒！
但却是何等的荣耀，他的思想，
穿透六合之限，延伸于苍穹，
他发展的符号将欢唱着他的骄傲，
引领他，穿越难以想象之道，
用还未诞生的方程，征服新的大陆……

前进吧符号，主人！迈着庄严的步伐，
前进，直到时空燃烧着的边界，
Dickenson 勾勒的时空只到二维，
但我们却能踏着他的脚印向前发展，
他卓越的灵魂，存在于在无约无束的
 N 维空间，在普通空间已难容下。

——麦克斯韦 (James Clerk Maxwell)

致 Cayley Portrait 基金委员会的信，1887



皮影戏

¹⁰ 宇宙仅仅是一出皮影戏？事实上它就如同印度尼西亚人神圣的传统——哇扬戏^①所呈现的一样。哇扬戏具有宗教仪式的虔诚，也有部分娱乐成分，但终归是一种在幕后操控的皮影戏。作为世界上最古老的叙事传统之一，它通宵达旦的表演揭示了在创造宇宙历史的进程中，上帝和魔鬼永无止境的斗争。

当观众在一面拉开的白色幕布前就坐后，一场典型的哇扬戏就正式拉开序幕。一盏油灯发出超越尘世的光辉，浸照在屏幕上。达郎^②在屏后就位，然后从两组手工制成的鲜丽的皮木偶中选择要登台表演的。两组皮偶，一组代表英雄人物，一组代表恶人。在达郎的后面，乐手们梦幻般的调子为传说平添音乐的质感。表演的过程中，达郎从来都不会与乐手有任何语言上的交流；相反，他们专心模仿出各种声音，与跌宕起伏的情节相得益彰。随着表演的进行，达郎魔法般地唤起一代代叙事者的记忆，传播着孤胆英雄的史诗。从夜幕渐垂到一斜斜乍暖轻寒的朝阳从大地醒来，完美的皮影戏人未曾歇息片刻。伴着老练的声音和动作，他鼓舞了传说中的战士们的勇气，让他们能和可怕的十头怪厮杀，可以在绵亘的时间中延续世代之仇，也敢于在求爱与背叛中勾画出热烈恋人的不朽传说。

¹¹ 所有观众都目不转睛地盯着屏幕，但是他们看到的不过是

① 印度尼西亚爪哇的一种古典木偶戏，将木偶的影子投到屏幕上表演。

② 表演哇扬戏的皮影戏人。

后台表演的投影。影子们相互穿透，转瞬即逝又突然出现，它们能够完成许多有形的东西都无法实现的表演。一头蛇发女妖可以轻松迅速地吞下一位挥剑男子，胃也不胀一下，嗝也不打一个；两个生物可以将它们的影子合二为一成为一头恐怖的巨兽。达朗很好地理解了两个王国不同的法则——光彩的王国在帷幕后面，黑暗王国则在帷幕表面上——所以可以根据细微的差异演绎各种各样的魔法。

像眼前看到的一样奇怪，这些天花乱坠的想象竟然可以用技巧而不是内容来表现真实。在物理领域有种新趋势——将宇宙看成皮影戏院。按照这种新颖的观点，我们所见的身边的世界，仅仅是更深刻的真实的一个影像而已。但世界真实的表现超越了帷幕，在更高维的舞台上。这个后台区域，至少比时间和空间多出一维，被称之为“囿”空间^①（bulk）。它永远也看不到（至少在视觉的意义上），因为光线无法进入。我们只能见证在帷幕上的影子，一个被称为“膜”的三维空间，然后去揣测“膜”外的东西。

无论如何，研究者正在尝试检验这个被称为 M 理论的新模型，当然是通过引力而不是光线。就如同达郎和他的乐手的关系，人们认为引力可以通过特殊的途径到达后台。按照 M 理论，它可以穿透“囿”空间，沿着“膜”在别处显现。如果的确如此，那么引力就可以令人信服地以超光速从一个区域跳到另一个区域。物理学家正在尝试着用加速器的数据等方法来

^① 意为无法触及之处。宇宙学中的 bulk 指除四维时空外，其他的封闭的维度。



证实这个假设。同时，也正在检验不同形式的卡鲁扎-克莱因理论给出的候选的宇宙模型。

柏拉图的洞穴

12 尽管 M 理论只提出来了十年，而更基本的卡鲁扎-克莱因理论的发表也不到一个世纪，但是，溯及远古人们就已经意识到肉眼所见的世界不过是真实世界的投影而已。哲学家们已经对柏拉图的“理念”（forms）观点^①迷恋很长时间了。按照古希腊先哲的说法，一切我们所见之景，只是一场幻象——完美的“理念”不完全的投影。这些“理念”可以让我们完美地描述知晓的一切：完美的太阳、完美的月亮、无瑕的人类、清爽纯净的空气和水，等等。

柏拉图把他的思想巧妙地寄寓于那著名的“山洞寓言”中。他想象一群囚犯被迫要在距离洞口不远的狭窄山洞中聊度余生，而脚镣让他们无法自由移动，因此他们只能盯着一面石墙。不过，情况还算不错了，因为远处火焰摇曳，映照出来外面的世界的影子投向山洞，山洞中的他们可以看见这些变化无穷的影子。也就是说，当人们带着各式什物器皿往返奔波于洞口与火焰之间的时候，囚犯也只能看见其轮廓。鉴于这些囚徒并不了解外面真实的世界，他们便会理所当然地认为那些平坦

^① 柏拉图认为，只有“理念世界”中的“理”或“形式”（Forms）才是永恒的和绝对的存在，是最高和美和最大的善，而经验世界里所有的存在包括动植物等自然现象和功名利禄等社会现象都是暂时的、不完善的，是“理念”拙劣的模仿品。

的影子，就是他们所知的万物之真实。

现在看来，柏拉图的山洞寓言似乎暗示：我们所处的三维世界不过也是更高维的真实世界的投影罢了——尽管这明显不是柏拉图的本意，因为古希腊人对于更高维的东西并不感兴趣。柏拉图设定的理想国度，仅仅属于形而上学的范畴，并非我们所处空间的多维扩展，因此他的故事直率地说，仅仅是隐喻了没有看到的完美世界，而不是没有看到的维度。

正相反，古希腊人觉得世界局限于长、宽、高的限制有其原因。亚里士多德是柏拉图的学生，生于公元前384年，他在作品《理想国》中更是强调了这种观点。亚里士多德坚信认识自然的过程遵循从直线到平面，然后是立体空间，根本没有更高维的存在。他认为三维实体乃是数学对象中最完美的类型，是无可辩驳和改进的。因此，没有别的东西可以在维度上超越它。为了更加夯实其想法，他列举了毕达哥拉斯学派的一个观点，即“三”是一个特殊的数字，因为万事皆有开端、发展和消亡。古希腊的毕达哥拉斯学派是个博学的团体，他们热衷于数学及其不同数的神秘性质。几百年后，托勒密在一本专著《关于维度》（*On Dimensionality*）里进一步阐述了亚里士多德的观点。这本书中，托勒密说到人们不可能通过一点画出三条以上的相互垂直的线条。¹³

可能是因为人们把毕达哥拉斯学派奉为经典，以后的柏拉图、亚里士多德等人发展的科学体系中，都表现了对三维几何的极端迷恋。这种情况也扩展到美术和建筑方面，从精确成比例的雕塑到宏伟的帕占农神庙的对称性。在数学上，古希腊人首先发现了仅有的五种正多面体（各个面相等），它们被称为



“柏拉图多面体”。它们是正四面体，立方体，正八面体，正十二面体，正二十面体。相比二维正多边形的无限数目（正三角形、正方形，等等），此种数目上的局限显得格外神秘，如此显著的差异让三维比二维愈显神圣。

欧几里得从这些重要的萌芽中汲取营养，并令那美妙的三维结构绽放出智慧的花蕾。他利用他的公设证明了那时已知几何体的所有基本属性。其中的许多结论现在的每个高中生都耳熟能详。例如，如果两个三角形形状完全相同，则它们的各边必然对应成比例。基于对角的讨论，欧几里得也解释了为什么只存在五个“柏拉图多面体”。

¹⁴ 19世纪以前人们还认为欧几里得的证明所基于的假定是无可辩驳的。前四条很显然：不同的两点确定一条直线。直线可以无限延伸。可以以任意点为圆心，以任意长度为半径作圆。所有直角必然相等。只要是熟悉简单平面几何的人，谁又能对此有异议呢？

欧几里得的第五个公设明显比前四个复杂：考虑两条直线，第三条直线与它们相交。这样便形成两个交点。假设同平面内一直线和两条直线相交，若某侧的两个截角均小于直角，则这二直线任意延长后在这一侧相交。

因为第五条公设讨论的是平行线的问题，故而也叫做平行公设。数学上，它等价于下面这个普雷菲尔（Playfair）公理：给定一条直线和一个不在直线上的点，有且仅有一条直线可以穿过那点并且与给定的直线平行。若以这种方法表达，人们很容易明白平行公设就好比一台复制机器，可以使平行线遍及整个空间。若人们想构筑一组平行线，那么找一条直线和不在这

条直线上的若干个点即可。由此看来，点自然而然地成为了平行线的基础。

考虑到平行公设相对复杂性，一代代数学家想弄明白它是否也可以从别的四条公设中推导出来。这种情况下，它的地位就不如前四条基本假设那么重要了。欧几里得自己也将其置于四个公设之后，而且在他的证明中，尽量避免使用它。许多数学家都尝试去掉第五个公设，但都失败了——直到19世纪初非欧几何的出现。高斯、鲍耶（Bolyai）、罗巴切夫斯基（Lobachevsky）证明了平行公设完全可以独立出来，而且事实上，它可以被别的假设代替。

直到那时，欧式几何才走下几何领域的神坛。但是尽管如此，它的创造性和长远影响是其他科学工作无法企及的，这也是古希腊人在这一领域杰出思想的明证。

达·芬奇的透视

罗马征服希腊后，获得了汗牛充栋的自然知识和哲学知识，并且罗马人抱着极大的热情加以利用。尽管罗马也有许多博学之士，但是他们的学问绝大部分并非独创，他们对发展自己的理论无动于衷。何况知识陈旧也无关紧要，靠着来自希腊的数学原理，他们仍然可以解决衣食住行，也可以兴建宏伟的寺庙、雄伟的雕塑以及其他的公共设施。¹⁵

基督教的兴起和罗马帝国的分崩离析直接导致了欧洲民众对于科学和文化态度的改变。希腊罗马式艺术建筑的考究和浪费被统一和俭省代替，人们不再去竭力解释当前的世界，而正



为即将来临的大时代做准备。

整个中世纪——大约从公元 5 世纪到 14 世纪，人们过分强调朴素的设计风格，结果绘画趋向平面化。那个时代的肖像画总是平坦而不真实，就像纸娃娃。当画家复制耶稣、玛利亚、圣徒们和新约圣经上人们沉静的肖像时，几乎不会把注意力放在第三个维度——深度上。

文艺复兴飘然而至。艺术创新犹如沉睡的巨人，依稀睁开眼睛，擦亮，然后凝视着这个崭新的世界。它审视大千世界，不放过任何细微之处，并且在愈加真实地描述世界的过程中，记录下一切令人怦然心动的地方。

这场革新运动的先驱之一乔托·邦多（Giotto di Bondone）是 14 世纪早期佛罗伦萨伟大的艺术家。当乔托在画布上挥舞画笔时，他就会想象物体在离他一段距离的某个固定的点上，然后他便在草图上勾勒出脑中浮现出的线条。因而，和先辈平庸的平面画相比，乔托的作品与众不同，显得栩栩如生。

随着乔托发现透视，第三个维度被他引入了美术。每逢乔托作画，人们就在门口驻足观看，就好像小孩子第一次新奇地看电视。人们交口称赞乔托的神奇笔，竟然可以把他们画得就像真人嵌在画布中一样。不久，其他的艺术家也开始模仿他的风格，希望可以创作出属于自己的动人的作品。

¹⁶ 为了提高三维空间的表现力，艺术家们开始研究早已被人们淡忘了的欧式几何。他们逐渐明白，明与暗的合理搭配可以增强肖像的真实感。从而，最好的艺术家也成了自然主义者和数学家，不断地计算作品中每处最佳的色彩搭配。

达·芬奇（Leonardo da Vinci）可谓文艺复兴时期的杰出画家。达·芬奇的艺术生涯从15世纪末延续到16世纪初，他致力于将肖像画表现得尽可能地活灵活现，把画布变成一面自然的镜子。他深谙数学、力学、光学、解剖学以及其他自然科学，并且以开创性的方法研究它们。他的笔记本上记录了曾经完成的对人和动物形态进行的最为详尽的研究，这些研究甚至揭示了在不同的运动中，各块肌肉不同的紧张情况，而这些素描也帮助他创造了众多现实主义题材的肖像画：似凝视，又似宁静的微笑（在他举世皆知的杰作中^①），皆由观者而定。

达·芬奇迷恋阳光投射于物体上形成的斑驳陆离的光影。他注意到明亮和深暗可以表达亲近和疏远之感。他发现，把原有的色彩与适当的亮色或者朦胧的阴影进行调和，可以增加作品的三维表现力。

与绘画向深度的发展相呼应，雕塑也开始苏醒。文艺复兴时期的雕塑作品同希腊和罗马时期的相比，它们更着重展现模特闪耀人性光芒的血肉之躯。其中，米开朗琪罗杰出的《大卫》，表情坚毅，充满激情的力量。它可能是这场文化复兴运动中最好的例子。

驾驭群星

我们现在知道宇宙的大小无法测量，甚至可能在广度上也无限延伸。但是，直到现代，人们依然对它的浩渺无垠缺乏认

^① 此处指达·芬奇的《蒙娜丽莎》。



识。例如在中世纪，人们想象世界是一个平盘，由毗邻的天体簇拥着。它们觉得，尘世的存在完全局限于一个平面，其上为崇高的上帝，其下为邪恶的魔鬼。

17 随着透视的引入并创造性的利用光线，美术空间在欧洲的文艺复兴时期得到拓展；同时，人们也开始重新思考物理空间的广袤。在大航海时代，大约从 15 世纪后叶到 16 世纪，哥伦布、麦哲伦等勇敢的航海家证明了地球是圆的。然后，到了 17 世纪早期，天文学家先驱伽利略通过他自己发明的望远镜研究了金星、木星和月亮以及其他天体。他证实许多天体具有相同的特征。木星也有卫星，就像地球一样；金星也有盈亏，类似月球；而月亮上的陆地表面上也有山，看起来就像地球一般。鉴于这些证据，伽利略得出在太阳系中，地球和别的行星的地位相同，都是围绕着太阳转动。它支持了哥白尼在 1543 年提出的日心说。

伽利略也将望远镜对准了璀璨的恒星。他发现无论如何放大，这些星星依然是一个个点，而不会成为圆盘状。所以，他推测它们要比行星遥远得多。当他把装置指向朦胧的银河，他看到那里汇集了不可计数的恒星。他觉得，那些无数亮斑遥至天堂。

伽利略的发现让人们饶有兴趣地推断，宇宙的大小是无限的。1686 年，法国科学家伯纳德·方特纳耳（Bernard Fontenelle）在他的论文《世界多重性的讨论》（*Conversations on the Plurality on Worlds*）中思考遥远的恒星是否也有环绕的行星？是否宇宙空间永无止境，充满了不能穷尽的可能性？这种想法呼应了那不勒斯的修道士布鲁诺的著作，后者在伽利略

的发现之前，就已经在哲学上讨论宇宙是否包含无穷的各种各样的世界。

与此同时，方特纳耳的书开始出现，英国物理学家艾萨克·牛顿的《自然哲学的数学原理》，通常称作《原理》（*Principia*）也得以出版，这是一本有关运动和引力定律的影响深远的书。我们可以把牛顿的宇宙看成一部雄伟的史诗，它在一个广大的三维舞台上演出，恒星、行星、月亮和彗星等都是剧中人；它们通过引力相互作用。物体沿着三个垂直的方向 x 、 y 和 z 运动，当然可以把这三个方向想象空间的直线。牛顿的物理也引入了第四条轴，叫做 t ，表示事件发生的时间。所以，就像爱因斯坦和利奥波德·英费尔德在他们的《物理学的进化》中指出的，《原理》用第四维表示时间的持续，是四维空间的萌芽。

到“时间”了

人们普遍相信，爱因斯坦创立于 20 世纪初的相对论，开创了四维时空的概念。实际上，把时间作为第四维的想法可以追溯到更早，韦尔斯（H. G. Wells）在他 1754 年的短篇小说《时间机器》里写道：“（时空）真的有四维，我们把其中的三维称为空间的三维平面，然后是第四维，时间。”¹ 这说明更早的时候，就有人对这个话题开始感兴趣了。

第一份关于第四维的文档是一篇叫做《维度》（*Dimension*）的论文。作者是法国数学家吉恩·达朗贝尔（Jean D'Alembert），写于 1754 年。达朗贝尔是牛顿物理学一位颇



有影响力的解释者，他在物体动力学方面的著作得到人们的高度评价，相关文字出现在被人们广为敬重的《大百科全书》中。它是由狄德罗（Diderot）和达朗贝尔共同编撰，按照字母顺序摘要叙述有关各时期的知识。在论文里，达朗贝尔讨论了具有长、宽、高属性的各种物体，然后他设想有一个时间方向，空间与这个时间方向结合在一起，形成了整体的四维空间。

当然，对于四维的发现，我们不能将此荣誉全部给予达朗贝尔。不过不可思议的是，他却将这份荣誉拱手相让给一位被历史尘封的学者。达朗贝尔称这位作者为“他所认识的能够启迪他的人”，此人宣称：“超越三维还是可能的……如果把第四维看作持续时间。”²

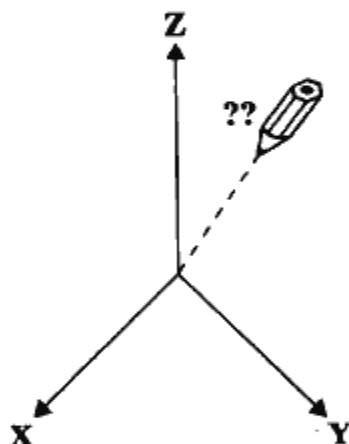
这位神秘的人是谁呢？一些学者认为是才华横溢的法裔意大利数学家拉格朗日（Joseph-Louis Lagrange），他后半生一直与达朗贝尔保持着私人通信。³事实上，1797年，拉格朗日在他《分析作用原理》中写了第二篇著名的关于第四维的文献。其中，拉格朗日提出人们可以把力学放在 x 、 y 、 z 和 t 的四维空间中考虑， t 便成为第四个坐标。

¹⁹ 所以人们认为拉格朗日是四维的原创者。但这种推测的主要问题是，当《大百科全书》出版时，拉格朗日年仅18岁。尽管他比较早熟，但毕竟对于一个这么年轻的人，其想法被一本那么权威的书引用，很不可思议。不过，拉格朗日几年后确实成为了一位教授，作为一位革新者，他在微积分方面作出了重要贡献，这奠定了他在此领域的地位。虽然时间和空间的联姻被证明是现代科学的精髓，但是我们可能永远也无法得知拉

格朗日、达朗贝尔或者其他具有深刻洞察力的数学家，谁是第一位红娘。

于是，上帝创造了空间

时间只是第四维的候选者，另一个方法是构思出超过三条的相互垂直的空间轴。确实存在第四个空间维度吗？乍一看，托勒密的论证似乎可以排除这种可能性，我们不可能画出第四条轴与三条相互垂直的轴线垂直。无论我们如何的努力尝试，第四条轴必然不能和至少一条轴线垂直。



无论人们如何尽力，也不可能画出一条垂直于所有三条空间轴的直线。

那么是不是存在这种可能性，即我们无法构建第四维是因为我们知觉的局限，而不是空间本身的问题？那么在别的世界的奇异生物能否感知第四维、第五维甚至更高的维度呢？一些动物可以具有比人类更强的感知能力，比如狗可以听得到高频的哨声。那么为什么不会在宇宙的某个地方，存在可以感知维度的生物呢？

20



人们知道，德国哲学家康德（Kant）是第一个对这种可能性抱有极大热情的思想家。在 1747 年出版的第一篇专题论文《对生存之力真实判断的一些想法》（*Thoughts on the True Estimation of Living Forces*）中，他对这个我们以三维观之的世界进行了深思熟虑。他引用牛顿的理论，假设答案和力的性质有关。他注意到，物体之间通过引力相互作用，力的大小与它们相互之间的距离平方成反比，而牛顿理论的这条定律的数学形式要求空间必须是三维的。

万有引力定律是如何告诉我们有关空间维度的信息呢？假设有两个行星，我们考虑在每个星球上物体受到的引力的相互关系。两个星球质量相同，但是前者的半径是后者的两倍。假设两个星球上都有一质量相等的巨石，那么按照牛顿万有引力的平方反比定律，在第一个星球上巨石的重量只有第二个星球上的四分之一。这个结论依赖于星球的三维存在。如果它们是二维、四维或者六维的，那么巨石的重量与距离都存在不同的关系。因此，重力随距离减小的精确关系是与空间维数有关的。

于是，康德开始思索具有不同维数和物理定律的其他可能的领域。因为上帝可以创造万事万物，康德觉得我们应当考虑这种可能性的存在。如果这个领域存在的话，我们一定早已得见，因而，那些空间必须完全脱离我们的世界，与我们不存在任何可能的联系；就像欧洲人到来之前的澳大利亚和新几内亚，那时它们置身于完全不同的环境中的，都是被孤立的岛屿。康德如此描述：

实的存在亦是有可能的。因为上帝的作品包罗万象、冗复纷繁。这种空间，无论如何是不会和别的不同结构的空间有任何的联系。因此，如此的空间将不会属于我们的世界，而分别是一个个离散的相互独立的世界。⁴

思考了这些奇怪的毫无关联的领域后，康德用神学的观点证明其不可信。他说，上帝偏爱和谐，而非混乱。故他总结道，尽管考虑空间的所有的可能性不失为明智之举，不过上帝所创造的世界应当是统一的三维存在，而不会是各种维度空间的混杂。

镜中世界

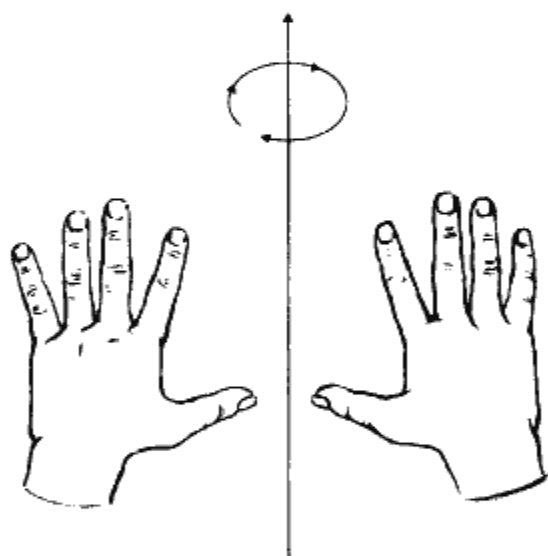
康德后半生被手征的表示所困扰。左旋和右旋究竟是什么东西？人们如何才能毫不含糊的把它们差别解释清楚？比如说，通向左右两边的门，顺时针和逆时针拧的螺钉；如果没有诸如“左、右、顺时针、逆时针”这些指示方向的词，我们能够清晰地分辨它们吗？

明辨手性看似容易，实则深奥。假设你正在用无线电和与我们完全不同的生物联系，一个叫做 Xyl 的奇怪生物，而且他并不熟悉人类这种存在形式。你想告诉 Xyl 你用右手写字，并向他解释左手和右手的区别，但是这样做只会让他迷糊。而你又不能说“当我拿支笔，我的拇指就在右边”，因为 Xyl 并不理解什么是“右”；而你也不能试图用方位去解释，说“当你面朝北方，你的左边为西边”，因为他也不知道北啊西啊是指



什么。可能你非常聪明，通过一些 Xyl 熟知的科学现象来解决这个问题，例如在遥远的星系中，一个特别亮的恒星的相对位置。但是不管怎么样，传递这种信息是很棘手的问题，其难度完全不亚于解释为什么人每只手都有五根指头。

22 大自然有个非常奇特的性质，它同时拥有左旋和右旋的物体。科学家曾经相信，在基本层面上，左旋和右旋数目相等。但是，他们发现某些微粒相互作用时，对其中的一种有所倾向。现在我们知道，尽管大自然同时给出了左旋和右旋的一些例子，但是它的确有所偏好。



只要通过第四个空间维度，左手就可以转换为右手。

一个左旋的东西能否等价地转换为右旋呢？要是个平面的物体很明显可以。如果你翻转罗马字母 R，就非常容易地造出了一个类似西里尔字母的 Я。请注意，翻转过程必须发生在字母 R 所在平面之外。也就是说，尽管字母 R 是一个二维物体，

但却需要在三维空间中拿起来翻转。

类似的，就像德国数学家牟比乌斯 1827 年指出的，三维空间的物体要想改变其左旋右旋的状态，只能在一个假想的四维空间中翻转，根本就不存在能在普通空间改变手性的翻转。²³

比如说，假设你经营一家鞋厂，由于降低生产成本的需要，你希望找到一个方法能把右脚穿的鞋变成左脚穿的鞋，这样的话只生产一种类型的鞋子就可以了。但是，如果不破坏鞋子，无论你怎么努力都无法完成这个任务，除非你能通过四维空间去做。

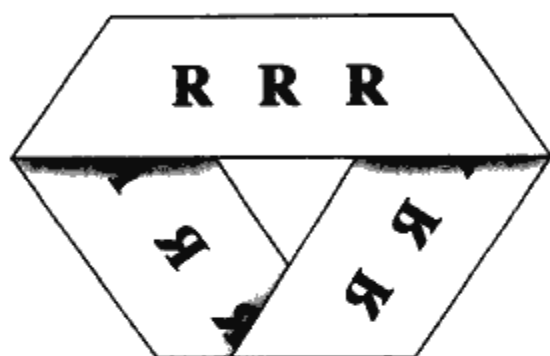
有意思的是，牟比乌斯晚年的时候，发明了一种非常流行的二维物体，叫做牟比乌斯带。捏着一条细长的带子的两头，扭转 180 度，再把两头粘合起来就做成了一条牟比乌斯带（实际上，李斯丁 [Johann Listing] 要比牟比乌斯早几个月发现牟比乌斯带，但是不知何故，牟比乌斯得到了这个荣誉）。因为只有半周扭转，所以这种带子只有一个面——不像皮带那样。拿支铅笔在牟比乌斯带上画一条连续的线，人们就会发现此线条既经过了带子的“里面”，也经过了“外面”。事实证明，里外两个面都是一样的。

现在，将一片纸裁成 R 形，然后让它沿着牟比乌斯带的外面移动。当移动至里面时，R 被翻转过来，变成了西里尔字母的 Я 了。故而，牟比乌斯带实际上充当了一个手性变换的机器！

用牟比乌斯带翻转二维物体和在四维空间用某种扭曲的东西翻转三维物体是等价的。这类四维空间的奇异物，有一种叫做克莱因瓶 (Klein bottle)。它看起来像个花瓶，这个花瓶的



瓶颈拉长，里面翻转出来，重新与瓶子的一面相连。这种情况下，花瓶的内表面与外表面相对应。这种构造还能盛水吗？当然可以，只要拓扑学家知道怎么样把这扭曲的四维东西弄出来。



牟比乌斯带，就是把一条带子扭转，然后与自身相连为一个环。它能够翻转二维物体。这里，它把第十八个拉丁字母转换为最后一个西里尔字母。

挑战欧几里得

24 考虑到高维空间存在的微小可能，康德和牟比乌斯各自提出了有趣的哲学问题。不同维度的在各自区域互不干扰的世界的存在是由于宇宙的多样性吗？左旋和右旋物体的存在是不是暗示有第四个维度，可以将它们相互变换？

尽管他们好奇，然而无论是康德还是牟比乌斯都没有去试图探索他们所假设的高维空间的性质。康德的淡漠，是因为他相信，即使这个领域存在，也永远和我们的世界没有任何联系，故而它超出了我们的理解范围。此后，他还在他著名的《纯粹理性批判》里强调：我们自己所处的三维世界，用欧几

里得的定律，已经足以详尽描述。康德相信，欧式几何从“纯粹的直觉知识”中衍生，因此是对事实存在方式的绝对描述。所以，对康德来说，试图否定欧式几何无异于把红色看成绿色，认为一加一等于三。康德固执观点的影响力甚至超出了他的时代（他死于1804年），它与同时代达朗贝尔的观点形成鲜明的对比。后者更多地持怀疑态度，达朗贝尔将平行公设称为“初等几何的耻辱”。

康德时代过了不多久，牟比乌斯也开始了研究。此时的数学家们正在不断努力，意欲动摇欧式几何这块巨石的根基。牟比乌斯的老师之一，高斯（Carl Friedrich Gauss）就是第一批预见到非欧几何产生的人。尽管被康德思想的遗老们威胁，高斯还是相当谨慎地坚持自己的信念。为了避免争端，高斯从来没有发表过有关这方面的看法。牟比乌斯的毕业论文是天文学方面的，但他以后成了拓扑学的先驱，因此，他清楚高斯的非欧几何研究乃是冒天下之大不韪。

虽然高斯态度谨慎，但是当他晚期的一个学生黎曼²⁵（Georg Friedrich Bernhard Riemann）以其卓越的才华，开拓了一条崭新的通向非欧几何的道路时，高斯也禁不住欣喜。黎曼新颖的观点不仅仅可以替代欧式几何的假设，同时构建了高维空间的结构。尽管黎曼在1854年就已经做了与此有关的就职演讲，但一直到1868年他的文章才得以公开发表，是年牟比乌斯去世。直至此时，西方数学家对高维空间的探索才正式拉开了序幕。

黎曼对非欧几何颠覆式的突破，不但从根本上改变了人们对多维空间的理解，而且也为爱因斯坦的广义相对论铺平了道



路。此外，它开拓的一个广阔的领域——统一场理论即以此为核心，经过卡鲁扎的发展最终确定下来。现在的理论物理学家都谨记着高斯这个杰出学生的厚礼。

一个城镇能独享某个伟大发现的全部荣耀吗？有时，研究工作的地点只是偶然的；然而，对于格廷根这个温暖而舒适的德国小镇却有所不同。这里被高斯的数学权威环抱，被黎曼的成功浸染，还点缀着无数继他们之后的数学家的卓越贡献。显然，这里空气中散发出的迷人气息必定产生了一定影响。

第2章 | 多维空间的景象

第四维在哪里，它又是什么？问题的答案肯定是：它就在这里——在我们之中，弥漫在我们身边——在一个我们永远也指不出来的方向上，因为它与我们已知的所有方向垂直。我们的空间不可能包含它，因为它包含了我们的空间。没有哪一面墙能把我们和这块领地分隔开来，即使冰冷的狱墙；即使我们在“那里”，也可能无法进入。它是片梦想之地，灵魂之境；藏于东风之后，隐于明镜之中。

——克劳德·布雷格登 (Claude Bragdon)，

《四维景观》(Four-Dimensional Vistas)，1916

魔法之季

瑞雪久久徘徊于德国中部的哈尔茨山，紧紧怀抱着她陡峭²⁶的悬壁，高耸的山峰，就像一件白色的长长的斗篷，遮住了令



人神往的神秘的美丽。随着春风拂面而来，她那神秘的面纱被缓缓揭开。真要感谢那些温暖的阳光，辽阔的森林转眼间绿意盎然，引来村民们沿着蜿蜒的小径四处闲逛。半木制的房子沐浴在和煦的春光中，花儿也从长长的木瓶里探出来脑袋。

哈尔茨为了庆祝春天的到来，有个古老的传统，叫做沃尔珀吉斯之夜^①，它连接着黑暗与光明。它是神灵、女巫和富饶的节日。在每个小村庄的商店，都陈列着手工制成的女巫，它意味着好运。传说每年的4月30日，一群独特而又魔力超群的女巫聚集在布罗肯峰——哈尔茨山的最高峰狂欢，她们施法舞去积雪，召唤新的生命。她们作为农神瓦尔普尔嘎（Walpurga）的助手，为其招使。这个可怕的情景曾经出现在歌德的《浮士德》里，还有穆索尔斯基的怪诞作品《荒山之夜》（*Night on Bald Mountain*）以及迪斯尼的《幻想曲》（*Fantasia*）刺激的终曲中，它们都向世人传达着这个神圣的传统。

27 在山麓小丘上，坐落着一个神秘与逻辑、事实与神话的中心，它以其卓著的学术而闻名。这就是传奇的格廷根，它是欧洲最为古老和享有崇高声望的大学城，是超过40位诺贝尔奖得主的故乡。它被茂密的锯齿植物环绕，与主要的工业和商业中心隔离，但是，它的产品——教育，却是科学史上的无价之宝。

格廷根最著名的学者的脸总是出现在德国的钞票上，这折

^① 瑞典的传统节日，人们称4月30日的晚上为沃尔帕吉斯夜。据说在这个晚上，生命和春天的力量将战胜死亡和冬天。

射出格廷根的双重特征。雅各·格林（Jakob Grimm）和威廉·格林（Wilhelm Grimm）两兄弟撷取了关于大山和丛林的迷人的传说，他们搜集那些经历数百年流传并被广泛阅读的民间神话传说故事，将其记载下来。接下来是高斯，传奇的数学天才，高斯和他的后继者把格廷根从一个仅被德国关注的主要研究宗教、文学和文化的飞地，一举变成被国际认可的数学和自然科学的领头羊。如此的荣耀持续一个世纪之久。



格廷根是德国最古老、最受人尊敬的大学城，这是它的一条街道。

格廷根也不是一直都对它的英雄尊敬有加。鹅卵石的街道²⁸和半木制的房子永远不能抹去历史上最黑暗的两个时期。穿过那些街道，从房子旁边静静走过去，仿佛能看到一百年前的两次政治迫害，让伟大的人物怀着恐惧四散奔逃。1837年，世人皆知的格廷根七杰——格林兄弟等七个人，因为反对汉诺威



(Hannover) 王国建立的保守体制，被驱逐出大学，那时，格廷根是这个王国的一部分，还没有加入前联邦德国；接着到了 20 世纪 30 年代中期，格廷根数学学部的人遭到大肆迫害，纳粹极端的法律迫使大部分数学家离开，其中包括学部主任理查德，此后格廷根的数学就没有恢复过元气。就格廷根在世界上的声望而言，高斯领导的那个伟大的时代从此一去不复返。

谦卑的天才

卡尔·弗雷德里·高斯是一个极为谦虚之人，说不定他自己都会惊讶他的影响力会延续那么久。1777 年，他出身于德国中部不伦瑞克的一个贫穷家庭，他的父亲杰拉尔德是一个园丁兼砖瓦匠，他那如慈父般的爷爷，是个农民。母亲那边的人从事石匠和编织工作。如果不是一连串幸运的际遇，他完全有可能在家族的这些职业中结束一生。



卡尔·弗里德里希·高斯 (Carl Friedrich Gauss)，19 世纪早期德国最重要的数学家，是非欧几何的奠基人之一。

即便不到三岁，高斯就显示出了非凡的计算能力。一天，高斯的父亲刚完成雇员薪水册，连路都走不稳的高斯，全神贯注地看着父亲，突然叫道：“爸爸，你算错了，应该是……”¹这个男孩的演算完全正确。不知道为什么，虽然他这个年龄连说话都很困难，却可以自学算术。

虽然这让杰拉尔德印象深刻，但他仍然想让孩子做工匠。²⁹他认为这样的禀赋应该用于很实际的地方。杰拉尔德从来都不理解为什么有人纯粹因为兴趣而对数学孜孜不倦地追求。只要有可能，他就会在孩子教育的道路上设置障碍。

幸运的是，高斯得到了他母亲多萝西娅的大力支持。在能力所及的范围内，她总是会捍卫儿子的兴趣，让他不受目光短浅的父亲的影响。高斯也很幸运有位富于洞察力并能够启迪他天分的叔叔，他的叔叔弗里德里希（Friedrich）看到了在高斯聪明而年幼的眼睛中透露出来的才华，他让这个男孩不断地接受各种各样的知识，让这个早熟的年轻人贪婪地吸收各种思想。

当然，有关这个年轻的思想者成就的故事是少不了的。高斯上学后，他的数学能力就让他第一位老师惊诧万分（他不断地在脑中进行100个连续数字的加法）以至于老师为他买下了当地能够买到的最好的算术教科书。更让老师吃惊的是，即使那本书对他来说也易如反掌。十二岁的时候，高斯已经开始思考欧式几何的替代问题。毫无疑问，这完全得益于叔叔的研究精神的影响，他对任何事物都不视为当然。

当高斯到了十四岁，他的另一个老师，数学家约翰·巴特尔斯（Johann Bartels）把他介绍给了一位厉害的人物——卡



尔·威廉·费迪南，不伦瑞克的公爵。费迪南一方面被高斯的谦逊打动，一方面惊异于高斯的天才，资助他完成学业。他出钱让 18 岁的高斯，这个年轻的天才，踏进了格廷根大学。

30 在格廷根做学生的时候，高斯找到了一生的至交鲍耶 (Wolfgang Bolyai)，后者致力于数学研究。一天，他把鲍耶带到家里会见母亲，多萝西娅把鲍耶拉到一边问他是否觉得她的儿子有朝一日能成大器，鲍耶斩钉截铁道，“(他) 将会是欧洲最伟大的数学家”²，多萝西娅禁不住涕泪纵横。

高斯遇到挫折难受的时候，鲍耶总会去安慰他。1806 年，正值高斯获得了赫尔莫斯特大学 (University of Helmstedt) 的博士头衔，离开格廷根回到不伦瑞克，这时法国开始入侵德国。作为一名勇敢的战士和政治家，费迪南没能成功地击退拿破仑，保卫他生长的土地。当公爵受了致命伤，奄奄一息地乘马车经过高斯家时，高斯惊恐地看着自己的庇护人远去。高斯知道从那刻起，他将成为自己命运的主人。

尽管拿破仑掠去了高斯的良师益友，但是这个法国将军的政治策略并没有阻拦住高斯的事业继续前进。这要归功于自然科学家亚历山大·冯·洪堡 (Alexander von Humboldt)，一个住在巴黎的德国人的帮助，高斯因此得以任命为格廷根大学的教授和天文台主管。几年后，法国人被赶走，汉诺威王国也被收复。那个时候，高斯已经安定下来，并且沉浸于研究中，他非凡的研究迸发出各种思想的火花，包括非欧几何方面的工作。

奇怪的平行

科学史上有些事很难解释，比如说经常有两三个独立的研究者同时得到相同的结果。很多情况下，这是因为解决问题的时机已经成熟。因而，非欧几何有三个相互独立的发现者，可能就并不是那么让人吃惊了。

其中之一便是高斯，他谨慎地考查过这个问题，但是却没有发表过他的解决方法。另一个是鲍耶的儿子琼斯。当鲍耶教授儿子数学的时候，他警告琼斯不要浪费时间研究欧几里得平行公设的问题。这种情况下，就像许多好奇的孩子一样，琼斯偏要反着来。他对这个问题做了系统的研究，得出平行公设可以独立于其他四条公理的结论。他发现他可以用一条其他假设来替代平行公设，1823年，他兴奋地告之父亲他发现了一个崭新的世界。在这个离奇颠倒的世界里，可以有无数条线通过一点并且与已知直线平行，而不仅仅只有一条。也就是说，一条直线和不在直线上的一点可以定义无数组的平行线。此外，这个世界中的三角形三角之和也非180度，而是小于180度。一些年以后，琼斯的父亲帮助琼斯发表了这个非凡的结果，同时提前给高斯寄去了文章复印件。

当高斯读完这篇文章，他回复了一封信，让琼斯既开心又备受打击。高斯说他是天才，不过同时告之他并不是第一个发展出非欧几何的人，高斯第一次展示了他对于这个课题的所有研究。这个糟糕的消息让琼斯难以承受，从此以后，他再也没有在数学领域发表过文章，相反，他在澳大利亚的军队中度

31



过余生，那里的人都熟知精通跳舞和剑术的他。

第三位在非欧几何这片领土的探险者是俄罗斯的数学家尼可莱·罗巴切夫斯基。像高斯一样，罗巴切夫斯基曾经也是巴特尔斯的学生，巴特尔斯将平行公设的难题告诉了他。和巴特尔斯的讨论点燃了罗巴切夫斯基的激情，于是他将那个公设置于一边，就好似一位北极的探险者丢掉了一切多余的行李前行，然后他构建出了一套类似于琼斯的几何体系。但是他们俩却彼此互不熟悉对方的工作，考虑到罗巴切夫斯基的文章发表在一份晦涩的俄文杂志 *Kazan Messenger* 上，这也不足为奇。最终，高斯找到了罗巴切夫斯基的文章，大加赞扬，并推荐他成为格廷根的皇家科学协会的通讯会员。高斯自己的有关非欧几何的研究笔记，还有他复印的鲍耶和罗巴切夫斯基的工作，在他死后的 19 世纪 50 年代中期才被发现，直到 60 年代末³ 才被广泛传播。

与古希腊人的洞察力相比，非欧几何就像是一条通向格廷根的蜿蜒的道路。如果人们要格林兄弟描述他们学院的工作，他们可能会用一个森林的传说作比方，那是一个最容易让人丧失方向感的地方。

32

在四月下旬，一个寒风刺骨的不寻常的晚上，一个伐木工人和他的儿子正穿过浓密的树林回家。他们想沿途收集那些被他们早上砍过的散落的木头，因此就决定各走一条路。因为在树林中很容易迷路，所以伐木工人就要他的儿子走一条和他平行的小径。

当那个男孩正在调整灯笼时，意外地踩到了农神瓦尔

普尔嘎亲手种下的一朵花。于是瓦尔普尔嘎勃然大怒，让她的女巫们诅咒那片土地。从男孩站的地方开始，女巫们创造了无数条小径，都与他父亲的路平行。就在那个时候，伐木工人喊道：“儿子，你在哪里？你还在和我一个方向的路上吗？”但是那个男孩看着头顶上令人迷惑的繁星发呆，茫然不知所措，再也走不下去了。山中传来私语说他的父亲永远不会找到他了。

传教士之子的考验

非欧几何空间可以分离亦可统一。在人生后期高斯才遇见了他忠诚的追随者，那是他的一个腼腆年轻的学生，然而却有足够的勇气完成这个老教授的梦想。因为这个学生的工作，高斯才在有生之年看到自己隐晦的梦想得以实现：在一个更为坚实的基础上重建几何大厦。

高斯在他教授的基础数学课上，第一次碰到黎曼，一个路德教会牧师的儿子。19岁的黎曼于1846年来到格廷根大学，全心全意地研究神学，他希望继承父亲的事业，但是，当他一开始大学的学习，黎曼意识到数学正在呼唤他。乞求了父亲的允许后，他改变了研究领域，开始参加高斯等人开的课程。

毫无疑问，当黎曼在讲堂里有了自己的一块地方时，心情是非常紧张的。进入之前，他不得不出示此课程的付费证明。那个时候，教授们各自为每个座位的使用权收钱。高斯把他的价格定得格外高，因为他希望班级规模比较小，这样能够在授



课的同时进行更重要的研究。

33

如同高斯一样，黎曼也出身于贫穷之家，黎曼甚至应该为出得起钱上这个班感到幸福。因为小时候营养不良，黎曼人生中的大部分时间为健康问题而备受折磨。此外，他在社会环境中也遭受痛苦和焦虑的侵袭，只有最亲密的朋友和亲戚才让他觉得舒坦。因此，尽管黎曼崇拜高斯，却仍然恐惧他的存在。

不过对于高斯给出的一些专业问题，黎曼惧色全无。他一边尴尬地面对高斯，一边满怀信心面对问题。轻松地掌握了他的课程后，1847年他离开了格廷根来到柏林大学，从师于几位杰出的教授，两年后，他又回到了格廷根，研习哲学和物理以拓展视野。

1850年，黎曼着迷于实验物理学家威廉·韦伯的工作。韦伯是格廷根七杰之一，那时刚被允许回来，是电磁学的专家。他是高斯的朋友并且和他一起讨论这些领域的问题。

当黎曼熟悉了韦伯的工作后，他开始执著于为所有的自然现象建立起单一的数学理论。他想知道是否有一个普遍适用的方法，可以只用单一的原理来解释重力、电学、磁学、热力学等物理现象。同时，他参加了由乔哈恩·李斯丁主办的拓扑方面的讲座。乔哈恩·李斯丁是牟比乌斯带的真正的发明者。这些兼具抽象的空间关系和切实的物理属性的知识让黎曼迸发出激情。黎曼着手用几何扭曲的性质构想一个能描述所有物理现象的东西，他的这种方法，要早于爱因斯坦、卡鲁扎等人半个世纪以上。

那个时候，黎曼正在完成他的博士论文，即将成为一名纯粹的数学家。作为此阶段的研究者，最有压力的事情莫过于要

渐渐完全独立地投身于研究项目了。而黎曼也正在朝这方面发展。除了常规的理论工作外，他逐渐把越来越多的时间花在数学物理还有他常规的理论工作上了。这时的他肯定感觉像一个滑雪的人，两脚各向一方，朝一棵树奔来。

在德国，一个人要得到学位并成为讲师需要经过很多步骤³⁴，首先要完成一篇学位论文。黎曼 1851 年做到了。他提交了一份讨论复变量的非常优秀的学位论文，给高斯留下深刻的印象。下一步是对论文的公开答辩，要讨论的是一篇叫做 *Habilitationschrift* 的文章——也可称为是见习的评论，对于黎曼来说，同样进行得很顺利。因为黎曼对于纯数学和数学物理的双重兴趣，这让他花费了更长的时间。当黎曼最后提交了他的文章后，他进入了最后阶段，试讲。

这对于一些学生来说，只是轻微有点焦虑不安，但是黎曼不同，他觉得就像是跳进了一片漆黑的无底深渊中。许多原因导致了他暂时性的精神崩溃。首先，他的心属于物理，而不是这个将要来的试讲，他的大部分时间除了为韦伯当助教外，都被消耗在了关于这个课题的研究上；其次，那时高斯病得很重，黎曼害怕高斯在审察他的教职资格之前就会死去；最后，那时黎曼的身体状况不是很好，被有限的精力折磨着。就像他在那段黑暗时期的描述：

我已经如此的沉浸于探究所有物理定律的统一。当试讲题目给我时，我无法那么快地脱离我的研究领域。那个时候，一部分因为担忧它，一部分因为在那糟糕的天气下在室内待得太久了，我感觉自己病了。我的老毛病顽固地



卷土重来，我已经不能继续我的工作。⁴

1854年6月10日，超空间诞生的那天。高斯精神百倍，完全可以主持这场试讲，于是试讲便如期举行。黎曼打起全部精神，仿佛有什么东西使自己全神贯注地在讲堂中开始报告。下一个程序，他已经准备了三个题目并按照自己的熟悉程度将其提交给高斯。令黎曼惊异万分的是，高斯打破了惯例，狡猾地选择了他的第三个题目：《关于几何学基础的假设》。

黎曼开始演讲后，就怀疑高斯已经熟知了这个领域。这场讲座就像是给工作了一辈子的神秘园丁讲解如何种植花朵。黎曼的每一个字，高斯都会微笑着赞同地点头。带着满腔热情，高斯为黎曼的演讲热烈鼓掌并授予了他讲师职位。

35 黎曼在格廷根当了许多年的无薪大学教师，然后成为了一名教授，但他用几何描述所有物理的一切努力都付诸泡影。他非常的不幸，因为他的媒介只有空间而不是时空，他的方案注定失败。不过无论如何，他的成果成为爱因斯坦工作的框架，爱因斯坦用它构建了奇迹般的广义相对论的大厦。

39岁时，黎曼患上肺结核。为了治疗，他来到位于马焦雷湖畔的意大利小镇塞拉斯卡（Selasca）。他于1866年的夏天逝世，仅仅比他的导师迟了11年。

超空间的蓝图

黎曼的就职演说于1868年发表，也就是这个时期，鲍耶和罗巴切夫斯基有关非欧几何的著作开始广泛流传。这三记重

拳给两千年历史的陈腐的欧式数学以致命打击。过时的世界观已然死去，黎曼几何学万岁！

黎曼几何用流形 (manifold) 的观点替代了原来刚性的圆周、平面等东西，流形是一个更加灵活的概念。简单的解释，流形就是点的集合，每一个点由一组代表坐标的数来表征。如果流形是二维或者三维的，那么每个点各自有两个或者三个坐标来表征。不过，因为可能的坐标的数目是无限的，所以人们可以构建一个任意维数的流形。这就意味着，我们可以像描述普通的三维空间那样去描述四维空间。

黎曼几何第二个创新的概念是度规 (metric)。度规推广了毕达哥拉斯的理论，毕达哥拉斯的理论相当于高中几何老师的曼特罗（一种神圣的语言形式，在祈祷、冥思或咒语中重复，如呼唤神灵、神奇的咒语或有神秘内涵的经书上的一个音节或一部分）。但是度规理论提供了一个扩展性更强的方法来定义两点间的距离。在传统的欧式空间，毕达哥拉斯理论指出距离的平方等于坐标 x 差的平方加上坐标 y 的差的平方，以此类推，著名的边长为 3、4、5 的直角三角形就是一个最基本的例子。但是另一方面，在黎曼空间，人们可以通过指定不同的度规来改变距离公式，比如说，人们可以定义距离的平方等于 x 坐标的差的平方的 2 倍加上坐标 y 的差的平方的 2 倍，诸如此类。人们要做的只不过构建一个新的度规来达到这种效果，因而标准尺度可以被拉长或者压缩，就像在达利的画中把东西变软，这就提供了无数种可能的结构数组，而其中的大部分结论欧几里得和他的追随者都无法理解。

另外两个概念叫“曲率” (curvature) 和“嵌入” (em-

36



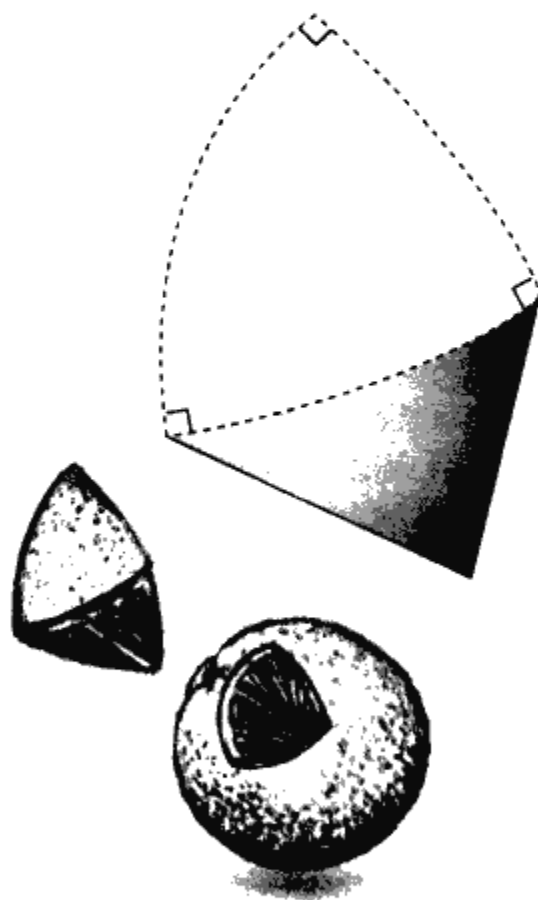
bedding)，它们更加能够显示出黎曼构建的世界和前人的不同。欧几里得的世界包含曲线，比如圆弧；包含弯曲的表面，比如球的一部分。但是却没有诸如弯曲空间的东西。相反，在黎曼几何中，任何流形的任何区域都能够被弯曲。因此，一个三维的物体可以像老式的黑胶唱片那样被卷曲。三维或者高维空间的情况下，一个很自然的问题是它们卷曲成什么？一种回答是，被嵌入了一个更高维的空间的流形中。所以，只要考虑到二维球面是被嵌入到三维空间中，就可以很好的理解它的曲率了。相应地，超球面的曲率（三维等价于球面）放在四维空间中就很好表述了。曲率和度规是相互联系的数学概念；每一个都可以从另外一个导出，也就是说，通过定义流形中两点之间的距离，我们可以得到流形的曲率结构，反之亦然。

黎曼对于几何的重构使非欧几何的可能性甚至比鲍耶和罗巴切夫斯基的还要令人奇怪。比如说，在某些情况下，直线是有限长而不是无限的，而且没有与其平行的直线。这违背了欧几里得五条假定中的两条，足以让欧几里得在他的坟墓里空翻两周！（据传闻，奥林匹克运动会的裁判员曾经给欧几里得颁奖，原因是他死后还能有体操运动员一样的反应。）

37

我们可以在球状表面观察到这种违背原来假定的情形。用黎曼几何的说法，它们属于“正曲面”，意思是说它们围绕着一个中心点弯曲。举个例子，我们要把一个橙子切开，考虑小刀的切割轨迹，这些线条经过橙子的“北极”和它的“南极”。很明显，我们从某一点开始，又会回到某点，这些线条是不可能无限延伸的。此外，因为所有的直线最终都会相交，因此也不存在平行线。

有意思的是，如果我们切一个橙子，那么经过一个“极点”并且沿着它的“赤道”可以切成一个三角形；把三角形的三个角加在一起，我们就会发现它们的和要大于180度。与此对照的是鲍耶/罗巴切夫斯基的几何学，他们称之为“负”曲面。在这个面上，一条直线和任意一个不在直线上的点可以定义无数条平行线；三角形的三个角之和小于180度。完全是一个全新的世界！



非欧几何的正曲率形式，三角形的角之和大于180度。



那么，物质是什么？

38

不像纯粹的抽象的空间，物理的宇宙包含着物质。它容纳无尽的物体，而且这些物体彼此在复杂的关系网络中相互作用。质量体——从环绕土星旋转的光环带到朝着地球下落的苹果——彼此之间通过引力相互拉曳；电荷由于所带电荷符号不同而相互吸引或者排斥。（正电荷或者负电荷，确切地说，这不是占星术。）

牛顿把物体之间这样的推或者拉看成是一定距离的相互作用，就像有根看不见的链条连接到宇宙这部机器的传动装置上。但是，到了高斯和黎曼的时代，物理学家开始思考完全不同的解释，他们认为因为有种特殊的媒介——场，物质在场中会产生一定的效应，然后场把这种扰乱传递给另外的物质，因此产生力的效果。高斯独立发展了一套数学方法——场线来准确地判断电荷的效应，称之为高斯定律。如果超距作用可以看成一艘拖船通过绳索拉另外一艘，那么场就可以看成第一艘船使水面起了波浪并让另一艘船不自觉地开始飘荡在水面。

当黎曼绘制好非欧几何的结构框架，这个框架就给我们提供了一种很自然的方法去描述这样的波浪。如果场并非独立于空间的实体，那它们有没有可能是空间自身的一部分？空间的几何构造才是力作用媒介？黎曼为这样一种可能性着迷——去实现他统一物理的目标——这折磨着他的神经并终归失败。不过，他让另一个数学家朝着这个方向迈出了更大胆的步子。

威廉·克里福特（William Kingdon Clifford）生于英格兰

的埃克塞特 (Exeter)。他有种神奇的天赋可以将空间的关系形象化。当他还是一个孩子的时候，他们家的一个熟人从印度带回了一个极具挑战性的三维难题。那是一个由错综复杂的许多环环相扣的部分组成的球，目标就是要找到一个方法把每一部分分开。在吃晚饭的时候，他们拿这个题目问年轻的克里福特。克里福特目不转睛地看着这个东西，也不去碰它，然后思索了几分钟就把它拿起来三下五除二地解决了。⁵

作为一名获奖学生，克里福特在伦敦皇家学院 (King's College)³⁹、剑桥三一学院 (Trinity College) 表现得都格外优秀，他 18 岁就进入了后一所大学。剑桥，特别是三一学院，在数学方面的卓著声誉比格廷根的历史还要悠久得多。毕竟，它坐落于伦敦，计算的鼻祖。

剑桥也出现了高维空间的计算，甚至比黎曼要还早。1843 年，数学家凯莱 (Arthur Cayley)，作为三一学院的研究员，发表了一篇题为《 N 维解析几何章节》 (*Chapters in the Analytical Geometry of N Dimensions*) 的文章。它给出了怎样用描述空间的坐标的数目来定义维数，同时给出了构建高维空间的方法。接下来的一年，德国数学家海尔曼·格拉斯曼 (Hermann Grassmann) 独立地发表了相同主题的文章。

与此同时，威廉·哈密尔顿 (William Hamilton) 于 1844 年，在坐落于爱尔兰首都都柏林的另外一个著名的三一学院发表了一篇相关的文章。题目是《关于四元数》 (*On Quaternions*)。文章中引入了将实数和虚数 (负数的平方根) 合在一起绘制四维空间这一概念 (高斯已经把这项技术应用于二维)。哈密尔顿提出，用三个不同的表示法 i 、 j 、 k 来表示负数的平



方根。他让每一个字母表示一条独立的坐标轴。与传统的实数直线一起，他定义出了四条相互垂直的轴。他证明了用这种表示法（称为 Quaternions）写出的任何数都对应于四维框架结构中的一一点。

接着，凯莱引入矩阵的概念，使他成为了线性几何的先驱。矩阵就是一个数组，以行或者列的形式排列。就像是普通数一样，矩阵也可以相加相减相乘。它也可以用来把任意空间中的一点变换到另外一点。凯莱证明了四元数理论完全可以用它的矩阵代数来表示。

作为剑桥大学的学生，克里福特抱着极大的热情研究这个课题。黎曼工作的最终发表使他想象的火苗肆意燃烧起来。克里福特想知道他是否可以利用非欧几何，像包含数学世界那样去把物理世界也包含进来。

40 1870 年，他发表了《关于物质的空间理论》，提出世界上的一切都是由空间的凸起组成这一概念。在克里福特看来，我们不仅仅可以通过几何描述场（电场、磁场、引力场等），也可以描述通过这些场相互作用的粒子。他如此论证：这个结构的基石，是“平（非弯曲）的三维空间的非欧几何的扰动”。如果我们可以在高维空间观察三维空间，它们将会像是沙漠中轮胎的轨迹。因为我们受限于这个三维空间，所以这些高维的凸出让我们有了物质实体的错觉。关于物质结构组成的基础，当时的人们几乎一无所知，因而克里福特的解释并不成熟。但无论如何，就像是黎曼关于物质的思考一样，它们在某种程度上预示了 20 世纪和 21 世纪理论物理的一些概念，包括相对论、卡鲁扎-克莱因理论以及 M 理论。

克里福特离开剑桥以后，被任命为伦敦大学学院数学和力学系主任。总的说来，他是一个非常优秀的老师，在学生身上花费了大量的时间。同时，他不懈地修正自己物质的空间模型。他是个天生的工作狂，每天辛苦完成教学工作，回到家里又彻夜地进行他的研究。一有闲暇的时候，就完全沉溺于给孩子们写童话故事。如此孜孜不倦的工作让他几乎没有什么时间休息，身体慢慢垮下去了。最后，克里福特就像他的英雄黎曼一样，被肺病夺去了生命。就在他 34 岁生日的前两个月去世了。

为数学家辩解

和凯莱、克里福特类似，数学家西尔维斯特（James J. Sylvester）也在卡姆河畔的庭院大厅的纷繁中度过了大学时光。作为一名犹太后裔的伦敦人，他进入了圣约翰学院——三一学院友善的竞争对手。他是个有胆识并且特立独行的家伙，从来不会因为社会压力隐瞒自己的观点或者在辩论中让步。要毕业的时候，按照惯例，剑桥的官员让他进行英格兰式的宗教宣誓，结果被他拒绝，他也因此没有拿到他的学位。

他从 1838 年开始漫长的学术生涯，那年他 24 岁。因为他⁴¹不是一名英国国教教徒，所以只拿到了唯一的一个职位——无宗派的大学学院的自然哲学的教授。工作是教授物理学导论，包括建立实验室和做演示实验。对于一个着迷纯数学的人来说，在这种实际的细节上花费时间比擦地板好不到哪里去。于是他溜到了弗吉尼亚大学（Virginia University），那里为他预



备了一个合适的数学教授职位。

西尔维斯特只在那个州声名狼藉地逗留了3个月，他因为一门课的纪律问题便不得不离开。上课的时候，他抓住了一个看报纸的学生，那学生便劈头盖脸地对西尔维斯特一番侮辱。西尔维斯特勃然大怒，用剑杖将其刺倒在地上。没想到那个学生就像演戏一样，大叫：“我被杀死了！”以此惊吓旁观者。事实上，那个学生并没受多大的伤，而西尔维斯特却受到极大打击。前者复原的速度远比西尔维斯特要快得多。当西尔维斯特向当局申诉完他们松散的管理体制后，就决定要立刻离开。他飞到纽约，他的兄弟西尔维斯特·J·西尔维斯特（Sylvester J. Sylvester）正在百老汇代理彩票发行。在美国的日子让他更加无法容忍，然后便乘船回到英国。

从此时开始，学术界的大门就对他紧闭了，所以他决定在伦敦的一家保险公司担任保险精算师的工作。另外，他也会选择一些学生辅导数学。因为弗吉尼亚发生的事让他记忆犹新，所以他不要任何粗暴的学生，只接纳“佛罗伦萨的南丁格尔们”^①。他得到了他所渴求的，佛罗伦萨的南丁格尔护士曾亲自过来接受他的辅导，此时她们正在为重建成千上万的医院而努力着。

接下来，西尔维斯特便沿着他称之为“世界的平坦之路”⁶向前发展，从事法律工作，在林肯法学协会（Lincoln's Inn）——一个到处是卷发法官和疯狂职员令人肃然起敬的

^① 南丁格尔：英国著名女护士，近代护理制度的创始人，红十字会创办人之一，这里比喻脾气好的人。

地方，熟识了凯莱，当时的凯莱已经是一名律师。他们成立了一个叫做“研究者吉柯与海德 (Jekyll and Hyde)”^① 的两人俱乐部。每当在饭桌上或者漫步时，他们就变成了理想主义的纯粹的数学家，而其余的时间又回到那些实际的法律事务中。西尔维斯特和凯莱成了终身的朋友和同事，他们成功地推进了矩阵理论和高维几何，并且共同发展了“不变量理论” (theory of invariants)，这个理论可以告诉我们哪个变换中特定的量不会发生改变。比如说，把正数改变符号变成负的但是平方后的结果仍不变。这个概念以后成了相对论的一个核心部分。

西尔维斯特热切地希望能有机会重新担任教授一职，1854⁴² 年他如愿以偿地在沃尔维奇皇家陆军学院 (Royal Military College) 得到这一职位。凯莱也于 1863 年在剑桥大学任教授。他们对高斯、黎曼和克里福特革命性的理论啧啧称道，并一道追随非欧几何激动人心的发展。

1869 年，西尔维斯特成为英国科学促进协会 (British Association for the Advancement of Science) 数理分部的主席。他决心利用这个机会，采用新颖的方法和观点，对他所知的前沿领域——新的数学领域的发现，比如超空间——整理一份充满激情的报告。这个报告在涉及面广泛的科学杂志《自然》 (Nature) 的第一卷上，分成两部分出版。西尔维斯特的那部分给广大读者介绍了一个令人震惊的概念，那就是世界上可能存在着比肉眼所能见的更高的维数。

^① Jekyll and Hyde: 该词源自英国 18 世纪作家史蒂文森 (Robert Louis Stevenson) 的小说《化身博士》 (The Strange Case of Dr. Jekyll and Mr. Hyde)。指在善恶之间变化的具有双重人格的人。



西尔维斯特用大量篇幅来讲解他所偏爱的主题，并且反驳了康德的空间直觉论。与康德的学说相反，他认为空间在物理上是真实的而且可以通过对客体的测量来进行探索。如果数学



西尔维斯特 (James Joseph Sylvester)，19 世纪受人尊敬的英国数学家，也是多维空间最初的创立者和倡导者。

家理性地猜测超空间存在，那就应该像对待那些可以感知的东西一样的去对待它。就如西尔维斯特所写：“克里福特先生……和我自己……都已经感觉到并且给出了处理四维空间的切实的例子，就好像它是一个能够让我们去想象的空间。”⁷

如果超空间是真实的，那么为什么人类无法直接体验到？西尔维斯特借用高斯⁸ 的类比来说明这个问题：有一只二维的书虫，除了属于它的那一页纸，其他一概不知。“正如我们可以理解那些生物（就像无限细薄的书虫在一页无限薄的纸上那样）只对二维空间有所认识，因此我们可以想象生物也可能存在于四维或者更高维的真实空间里⁹。”

在他发表于《自然》那篇文章的一个非常长的脚注中，西尔维斯特用这个类比传达了克里福特的物质空间理论（在文章发表之前西尔维斯特已经学习过这个理论）：

克利福特已经沉浸在一些重要推论中。它表明我们人类，可以从光学和电磁学某些特定的无法解释的现象中，推断一个事实——我们三维的空间隶属于四维空间（那是一个我们无法想象的空间，就好似我们的空间对于那只假想的书虫来说，也是不可思议的）。书页的皱褶便是一个不恰当的类比。¹⁰

西尔维斯特的讲话出现以后，《自然》就成为关于高维空间可能性的一个持续辩论的场所。致编辑的信件都是关于这场争论看法的文章。西尔维斯特的书虫论，成为各种微妙差别的解释的焦点。人们日益增长的兴趣促使克里福特在1873年翻译并出版了黎曼的演讲，以飨《自然》的读者。一旦普通的科学大众开始熟悉超空间，也就离它落入人们俗套的想象不远了。

客厅里的小把戏

到了19世纪后期，以欧洲大学为中心，科学革新之风已经吹拂了数百年，但还是有为数众多的人执著于陈旧腐朽的观念。从格廷根哈尔茨岛东北的小村庄到伦敦梅费尔（Mayfair）色彩斑斓的庭院，鬼神、仙女和巫婆等传说的迷信，在人们心



里深深扎根。可当科学席卷了越来越多的领域，他们开始迷茫那些传说中的神奇人物究竟是否存在。

因此，当超空间的概念刚刚浮出水面，许多人就考虑那个领域一定充满了灵魂。如果科学将我们可见的三维空间牢牢包围起来，那么昔日神秘的天使和恶魔就可能在超越这个空间之外的空间寻觅到了他们的栖息之地。（一位作家，A·T·斯科菲尔德 [A. T. Schofield] 在 1888 年甚至声称上帝居住在四维空间。）

公众对于高维空间与神秘主义关系的认知在 1877 年被固定下来。那时，伦敦发生了一起关于美国媒体亨利·斯莱德 (Henry Slade) 的欺诈官司，官司的判决引起轰动。因为斯莱德在一些知名的伦敦人士面前进行降灵表演，以此来吸引别人的注意。因而，他被指控“使用一些狡猾的技巧和装置，通过手相术等方法”来欺骗他的信徒。这时，德国物理学家约翰·珠勒 (Johann Zöllner) 为亨利辩护，号召通过科学的方法来检验斯莱德的能力。

在珠勒等证人的监视下，斯莱德表演了一系列看起来完全不可能的把戏。他把两个分离木环相互连在一起，从一个密封的容器中把物体取出来，把一个两端已经结在一起的绳子的结打开，在夹于两块页岩石板中的纸上书写信息。珠勒被这些看似非凡的技巧冲晕了头脑，得出了唯一的解释——斯莱德已经找到一条可以避开长、宽、高的别的维度来移动东西的方法。

45 珠勒就好像宣告一个革命性的科学发现，激情四溢地向公众报道他的结论。在他看来，他已经发现了一个崭新世界的入口。即使别人怀疑地指出任何优秀的魔术师都能重复斯莱德的

把戏，珠勒仍然在一些学术著作中肯定地写到高维空间是真实的。此后，就像美国建筑师克劳德（Claude Bragdon）所写，“珠勒的名字成了一个被人嘲笑的词，而第四维也成了伪和假的代名词。”¹¹

从那个时刻开始，那些对超出普通维度领域感兴趣的人都不得不强调他们的观点与神秘主义没有任何纠葛。因此，每当有严肃的科学家或者数学家放弃他们的观点，就会有一打的神秘主义者拿出第四维来考验他们的信仰。“另一个维度”这一表达已经等同于精神世界了，至今依然蕴含这层意思。

布拉瓦茨基夫人（Helena P. Blavatsky）创立了通神学会，使通神运动于1875年兴起。它激发了人们对高维空间的神秘性更加浓厚的兴趣。通神论是一个玄妙的系统，通神论者希冀从多种途径来获得世界的真相，包括克白拉（Kabbalistic）文本、吠陀（Vedic）^①教义和卓越的希腊作品。布拉瓦茨基夫人想象她可以使用非现实世界的的知识来理解物质及科学其他方面的属性。例如，她坚持只要通过改变它们内部的属性，物质就可以彼此穿透——就像在斯莱德的奇技中那样。

诸多通神论者被珠勒激发出灵感，拥抱第四维空间，把它当成能够解释物质和精神的一条路子。布拉瓦茨基夫人自己却怀疑这个观点。在她最著名的作品《奥秘的信条》（*The Secret Doctrine*）中，她驳斥了第四个空间维度的观点，并用一种新的理解物质属性的方法代替之。正如她解释的：

① 印度古语的译音，含知识和智慧的意思。



当一些无畏的思想家拼命地追寻第四维，以此解释物质相互穿透的道路，解释如何在一个没有末端的绳子上制造出一个结的时候，他们真正想要的，是**物质的第六个特性**。世界的三个维度真正应该只有一个属性或者特征……外延；而目前人们通常的感觉恰恰与这个观点对立，即在任何情况下，事物可以有超过长宽厚这样的三个维度。这些东西，以及“维度”本身，都隶属于思想的一个水平面，隶属于进化的发展阶段，隶属于物质的一个特性。¹²

46 尽管布拉瓦茨基夫人如此认为，许多通神论者仍执迷于四维空间，并将其等同于“星界位面”这个概念。李必特（C. W. Leadbeater）是位有影响的通神论者，他关于这个领域专门写了一本书，说明星界位面是一个非物理的领域，推测在那里超视等神秘现象都可以发生。就如李必特强调的：“从别的星球得到的视野过小，除了认识第四个维度，没有别的方法可以透彻理解星界生命。”¹³

鼓吹四维空间神秘意义的通神论追随者还有克劳德·布雷格登和俄国通神论者彼得·邬斯宾斯基（P. D. Ouspensky）。关于这个领域，布雷格登写了一系列的通俗书而且把超空间这种元素嵌入了他的建筑设计中。他也参加了邬斯宾斯基的《第三工具》（*Tertium Organum*）的翻译工作，那是一本声称解决了世界大多数谜团的书。

“心灵研究协会”建立于1882年，是一个致力于科学地研究超自然体验的组织，对于超空间也颇有兴趣。协会的创始成员包括哲学心理学家威廉（William James）和物理学家克鲁

克斯 (William Crookes) —— 珠勒的强烈支持者。王尔德 (Oscar Wilde) 的《古堡守护灵》(*The Canterville Ghost*) 对协会的活动有著名的讽刺描写，这本书提到一个鬼魂通过四维空间从房间逃脱。

切开超立方体

当针对珠勒的争辩尘土喧嚣之时，西尔维斯特正踏上他的第二次数学生涯。当他 1870 年被迫从伍尔维奇 (Woolwich) 退休以后，西尔维斯特本以为他的学术生命就此终结。他回到伦敦家中休养，把大部分时间都花在阅读和创作诗歌上。他写了一本关于诗律的书《诗韵之法》(*The Laws of Verse*)，并格外引以为傲。1876 年，位于巴尔的摩 (Baltimore) 的新建的约翰·霍普金斯 (Johns Hopkins University) 大学想邀请他做数学系教授。尽管他对于以前在美国败兴的生活耿耿于怀，但还是愉悦地接受了邀请，在 62 岁时得到了一个受人尊敬的新的职位。

西尔维斯特一到霍普金斯，就变得像糖果店里的小孩子。⁴⁷ 他激动万分，因为能够为那些毕业生设计职业生涯，这种快乐是他在英格兰从未体验过的。那些学生如此友善并且对知识热切渴望，他甚至一次都没有挥动过他的剑杖。同时西尔维斯特也饶有兴致地想继续推进数学的发展，最后，他创办了美国数学杂志 (*American Journal of Mathematics*)，这个出版物最初主要是他和自己的学生及同事展示工作的平台。

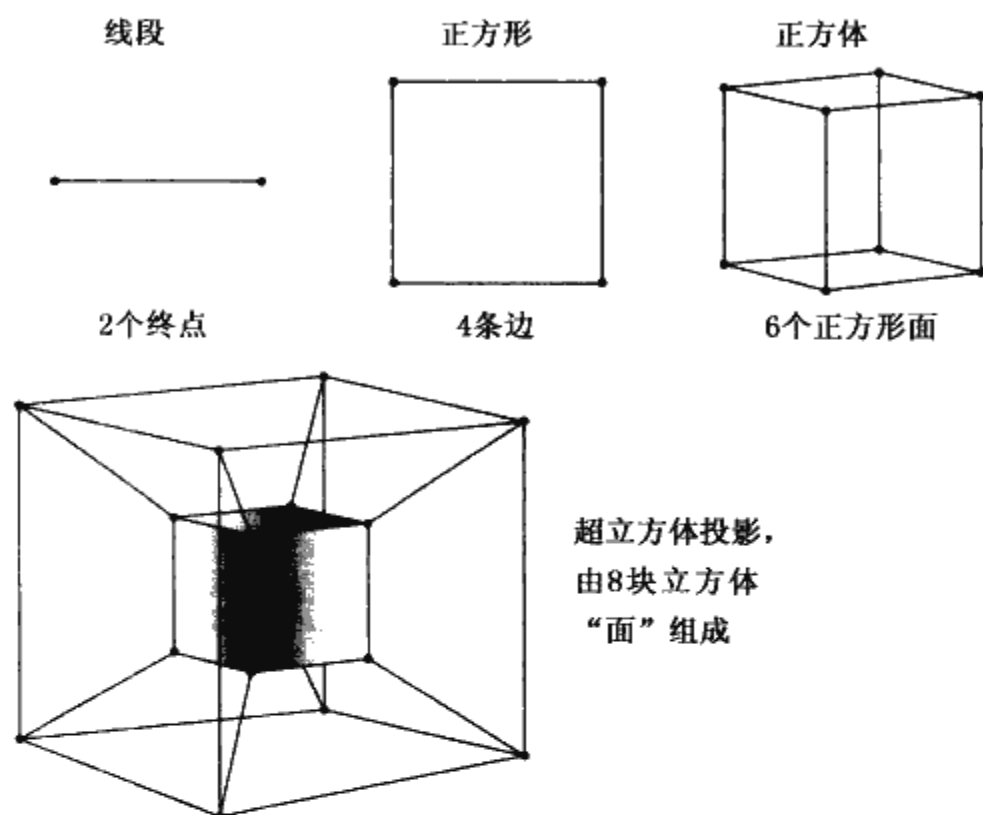
斯特林厄姆 (W. Irving Stringham) 是他的得意门生之



一，斯特林厄姆有着类似于克里福特那样将空间视觉化的本事。他将这项才能应用于导师热衷的领域，构建呈现超空间的大观园。这些关于正四维物体（类比于柏拉图立体）的描绘，看起来就像被我们能够意识到的三维空间将那些四维物体切成一片一片。斯特林厄姆用欧拉（Euler）的理论——几何物体中面、棱、角数目关系理论，来构建这些东西。1880年，他在美国数学杂志发表了充满艺术性的四维图画。

斯特林厄姆的研究项目之一，超立方体，随后变成了一个被人描绘得最多的四维物体。它的组成可以看成是自然的点、线段、正方形和立方体的延续。在一个平面空间，一个点朝着任何方向运动的轨迹形成一条线段。一条线段，平行移动与原长相同的长度就成了一个正方形。如法炮制，同样可以让一个正方形造出一个立方体。那么，简单的扩展，为了画出一个超立方体我们应该想象把一个立方体在第四维平行移动。很明显，我们无法在纸上做出来，人们无法满足于画出两个立方体，然后用线段将每个对应角连起来。只有借助于最近发明出来的动画化的计算机图形加上专业的研究人员（诸如班考夫 [Thomas Banchoff]）才能够在这条道路上取得重大进展。

⁴⁸ 获得霍普金斯的学位以后，斯特林厄姆在德国莱比锡得到了一个职位，与著名的数学家菲利克斯·克莱因（Felix Klein）（和奥斯卡·克莱因没有关系，卡鲁扎-克莱因理论的共同创立者——此外菲利克斯和奥斯卡谁都不是西蒙 [Neil Simon] 的著名戏剧的灵感来源）共事。克莱因在非欧几何学方面做出了重大贡献，还发展了克莱因瓶，他坚定地相信抽象数学存在物理模型。斯特林厄姆的设计和克莱因的提倡鼓舞了



人们可以将四条线段组合为一个正方形，将六个正方形组成一个立方体。依此类推，人们或许可以想象将八个正方体组合为一个超立方体。

数学家施莱格尔（Victor Schlegel）构建多维固体的真实的三维表示。这些“多维的玩具”在1884年的物理学家大会上首次亮相，之后不久就可以买得到了。格廷根数学系弄到了很多，它们至今还被放在突出位置郑重地展示着。

1883年，西尔维斯特收到了令人激动的消息，牛津大学⁴⁹有意让他担任教授。尽管他在霍普金斯生活得很快乐，但他仍然思念着英格兰；于是决定再做一次横跨大西洋的旅行。西尔维斯特大方地帮助霍普金斯的官员找一个合适的接替者，他让斯特林厄姆调查克莱因是否适合这个工作，也邀请凯莱申请。



最终，这个位置给了纽科姆（Simon Newcomb），一位加拿大的天文学家。他开始接手美国数学杂志同时继承了西尔维斯特对超空间的兴趣。

西尔维斯特在牛津度过了许多年美好的时光，于 1897 年逝世，享年 83 岁。他的数学研究几乎终其一生。朋友凯莱比他早两年而去，从此可能已经没有别的英国数学家可以与他深入探索高维空间几何了。凯莱的非凡发现，西尔维斯特的无限热情和无畏的争论糅合在一起，激励了整整一代思想家将超空间视为他们思想的栖息之地。

构建超正方体的工具包

从凡尔纳（Jules Verne）到罗琳（J. K. Rowling），幻想文学的背景皆不尽相同。一些定位于真实的地方——比如说月亮，或者地心；另外一些则完全属于想象，就像龙穴或魔法学校。关于超空间的故事成了第三类，属于物理真实的延伸，可能真实存在，也可能虚无缥缈。

在 19 世纪后期，来自伦敦的三位科幻作家构成了超空间传说流派的先锋。首先是欣顿（C. Howard Hinton），那个时代的人们对他较为熟知，包括一些名人如威廉·詹姆士（William James），而现在的人却少有耳闻。不过，他的影响通过受他的作品鼓舞激励的人们得以延续。其次是韦尔斯，现在还有谁不熟悉韦尔斯——《时间机器》、《隐身人》、《世界大战》的作者和著名小说家呢？和凡尔纳一道，韦尔斯实际上开创了科幻小说。还有埃得温·艾博特·艾博特（Edwin Abbott

Abbott)。艾博特以其一部小说《平地》(Flatland) 闻名，但鲜有人知道他别的作品。

欣顿出生于 1853 年，是著名外科医生和放荡不羁的作家詹姆斯·欣顿 (James Hinton) 之子。因为他父亲的世界观，欣顿年纪轻轻就过分纵欲。他的妻子玛丽——著名的数学家乔治·布尔 (George Boole) 之女，出身于一个相似的宽容的家庭。在这样的背景下，欣顿生活上的选择变得多种多样，包括成为一位数学教授，一位作家或者打破传统的浪荡子。他考虑了上面所有可能，最后选择了一个刺激但是声名狼藉的生活方式。

他的教学生涯开始于阿宾汉姆学校的校长一职。他几乎没有花费太多时间，就开始了第二个职业。1880 年，以一篇《什么是第四维？》(What Is the Fourth Dimension) 的论文开始，他在数学和科学领域发表了为数众多的散文和故事。尽管他的内容包罗万象，但是他的注意力一直都集中在展示超空间的方法上。

记忆和健忘在欣顿的个人哲学中扮演了重要角色。他相信，人们能够抹去他们原有的思维形式，引导他们的大脑接纳新的知觉模型。最终，他开始发展一个系统，通过它任何人都可以学会如何“看”到第四个维度。康德的观念里，空间乃是直觉的一种形式，但他断言通过训练思维，超空间也能作为直觉存在。

欣顿这样实施他的技术：他把四维物体的每一个构件都用名称和颜色表示，来帮助大脑记住其搭配。他创造出了 tesseract 这个名字来指示超立方体，并发明了“ana”和“kata”



两个词根表明物体在四维空间移动的两种方式（类似于上和下）。通过颜色标记，他详述了如何一步一步展示四维物体的方法，通过这种方法，人们可以描绘出一个超立方体在普通空间中的移动。

欣顿意识到没有人可以迅速理解四维物体，基于这个原因，他的方法描绘了一个四维固体通过一定的时间逐步展示的过程，就像有一台摄像机缓慢地记录下它的运动。这样的技术在当代电影中，被用来刻画庞大的宇宙飞船或者其他巨大的结构（比如说，泰坦尼克号）。导演不会一下子将整个飞船展现出来，相反，他们可能会选择从飞船的一端逐渐地拍到另一端，使观众能很好地感受它的硕大。与此类似，欣顿相信可以将四维物体通过我们空间的图景演示出来，通过这种途径人们就可以欣赏它们。正如他强调的，“所有将第四维视觉化的努力都是徒劳无功的。必须在三维空间中即时体验。”¹⁴

51 尽管欣顿如此告诫别人，但是他的超立方体图像实际上仍然成为了一个象征。欣顿注意到人们可以切开一个立方体的表面并将其平展成一个十字形。由立方体的四个面组成垂直部分，另外两个组成其水平条。类似的，我们可以想象将超立方体的外面切开，展开成一个三维的十字形。这种情况下，四个立方体垂直垒起来，另外四个则形成两个互相垂直的水平条。超现实主义画家达利以后把这种让人惊异的图像融合进了他的作品《耶稣受难》（*Christus Hypercubus*）中。

欣顿有一个吸引人的理论，认为第四维在物理上是无法到达的。他提出，就像接近于平面的硬币或者被裁去的纸板，我们只能在那个方向上延伸一点点。单个的实体如果是三维的，

那第四维就是无法察觉的纤薄。欣顿提出因为高维的微细而无法被观测的理论，却奇妙预言了卡鲁扎-克莱因的方法。

玛丽·欣顿非常支持丈夫对于知识的追求。但对于他的个人生活，她就无法去鼓励他了；她需要坚不可摧的神经。在阿宾汉姆的时候，他不知从哪里带来一个叫玛德的女人，所有人都以为是他的妹妹。最后事实证明，他结了两次婚，和玛德，也和玛丽，他的双重婚姻一直延续到和第二个妻子生下了一对双胞胎。有关当局发现这件事后，他被监禁了三天。一得到释放，他就和玛丽从英格兰远飞至日本，不久后到了美国。玛丽，可能因为其自由宽容的教养，始终坚定不移地站在他的男人一边。

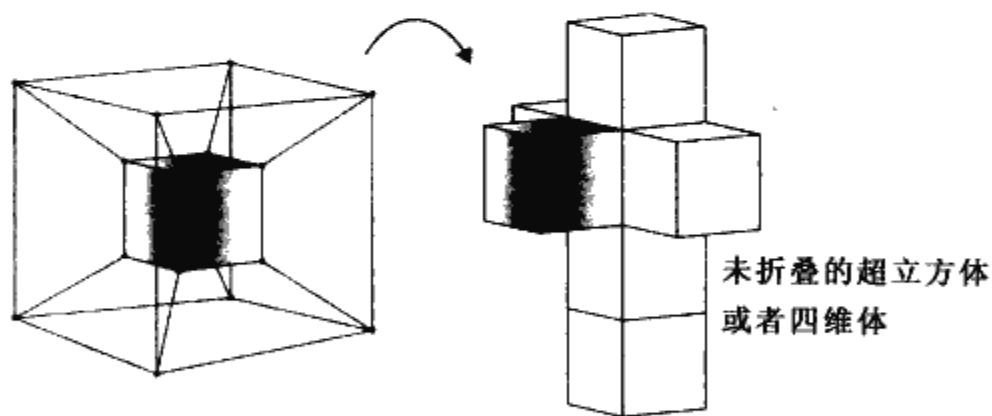
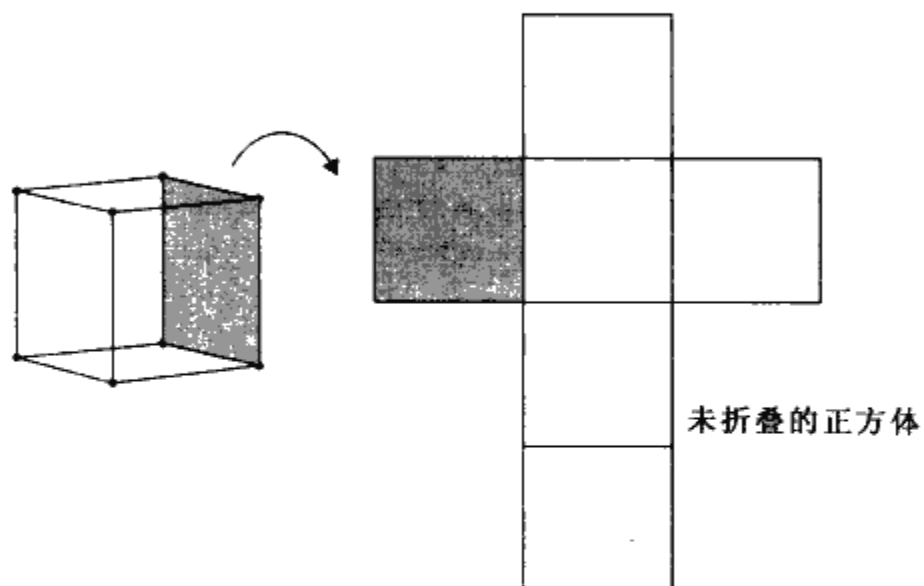
在美国的时候，欣顿在普林斯顿数学系找到了一个大学讲师的职位。他将大部分时间花费在为普林斯顿棒球队发明“棒球枪”上，这种枪可以以时速70英里射出球，它将棒球投手们从训练中解放出来。它甚至带有一个特殊附件，利用它可以发出曲线球。教练们喜笑颜开，不过欣顿却被炒了鱿鱼。

接下来，他在明尼苏达州也被解聘了。此后借助西蒙·纽科姆的帮助，欣顿在华盛顿的美国海军天文台获得了一个职位。这是因为纽科姆对高维的迷恋，他对欣顿的工作非常感兴趣并且希望这个被放逐的思想家重操旧业。欣顿在华盛顿过完了一生，于1907年逝世。⁵²

欣顿的死与众不同，可以视为他特立独行的一生中登峰造极之点。当他参加“慈善调查协会”（Society of Philanthropic Inquiry）的宴会，典礼主持人提议向所有女哲学家祝酒。欣顿拿起他的杯子荣幸地接受了这个请求，然后简简单单的倒地⁵³



而去。或许，这也预示了，在他的讣告中，对他发明的棒球枪的优先介绍，如他在作品中写的一样的多。



一块正方体，展开平铺到平面上，看上去就像十字架。类似的，一个超立方体，平铺到三维空间，看上去就像三维的十字架。（组成十字架的一些立方体由于遮挡无法看见。）萨尔瓦多·达利在他的美术作品《基督超立方体》（Christus Hypercubus）中探讨了这一主题。

展开《平地》

埃得温·艾博特·艾博特是另外一个因为对高维空间的迷恋，从校长转到作家的人，不过，和欣顿的相似也到此为止了。至少在生活方式上，艾博特虔诚而欣顿放荡不羁，艾博特视信仰和勤奋工作为存在的关键部分。在他看来，“懒惰、散漫和欺骗是最无法饶恕的罪过。”¹⁵也就是说，艾博特的信仰并非枯燥乏味，而是充满热情和异样的光辉——对不同背景的人显出的容忍和对教育的终极关爱。

艾博特出生于1838年，他进入剑桥的圣约翰学院然后被任命为英国国教牧师。年仅26岁的他出类拔萃，开始领导伦敦城市学校（City of London School）。学校坐落于城市中心，是伦敦不同阶级和教派者的天堂。艾博特在这兼容并蓄的环境中享受着乐趣，并拒绝了管理一个更好的学校的机会。他把伦敦城市学校塑造成当时一个颇富争议的，但最为进取、最具革新和最有科学性的先进的教育中心。当拥挤的学校的发展速度已经超出其容纳的极限时，艾博特充满激情地决定兴建一个更大规模的校区，拥有先进技术的实验室、舒适的报告厅和充足的运动场地。他对于学校教育的兴趣影响了狄更斯（Dickens）及其他19世纪进步思想家。

艾博特建设的新房子非常美丽，恰好坐落在泰晤士河畔，看上去就如同文艺复兴时期的宫殿一般，而不是全日制学校。隐约闪烁微微柔光的白色砖石正对着著名的英国人物雕像，包括培根（Francis Bacon）、莎士比亚（William Shakespeare）、



弥尔顿 (John Milton) 和牛顿 (Isaac Newton)。这些塑像很好地体现了校长的内心诉求，艾博特在培根的哲学、莎士比亚的语法、解释圣经和物理学上都是广受尊敬的权威。

54 艾博特梦想大厦的建成意味着他有了更多的时间，来做更加高兴的事情：把思想付诸笔端。他援引《旧约全书》中进入应许之地后约书亚就取代摩西的比喻^①，考虑辞去职务成为一个全职作家兼学者。虽然如此，他还是在这个职位上又待了七年。同时，完成了他最富创造力的作品，包括精致的培根传记以及最著名的《平地》——奇妙的关于多维的科学罗曼史。

在培根传记中，艾博特赞扬这位英国哲学家自由的思想并描述了在提倡科学进步与偏见作斗争的过程中培根遇到的重重阻力，艾博特的传记里特别提及了培根是如何与顽固的亚里士多德的追随者战斗的。《平地》的主角针对他自己社会的“亚里士多德们”发动了一场相似的论战，他提出他的世界有额外的看不见的维度。艾博特把这本书献给“空间的栖息者”，因为他们“能够去追求越来越高维的秘密——四维、五维甚至六维，从而将想象的边界不断扩展”。¹⁶

艾博特以主角的视角来叙述《平地》，把章节安排得像一部奇迹般的发现者日记。第一版出版于 1884 年，艾博特的名字在书上哪里都找不到，他以主角的名字“正方形”署名。如数学家拉克 (Rudy Rucker) 说，因为艾博特的名和姓是一样的，就像一个数的平方。^②，如此看来像是一个巧妙的安排。¹⁷

① 《旧约全书》中记载，摩西死后，以色列人为摩西哀悼了 30 天，之后他们就在新的领袖——约书亚的带领下，越过约旦河进入了应许之地。

② “平方”和“正方形”是一个词 Square。

无论如何，正方形具有他名字所指示的几何形状，生活在一个充满许许多多别的形状的二维世界。

尽管书名不怎么样，《平地》却是一本富有层次的相当有深度的书。艾博特记述了一个等级社会，但它局限于一个平面中，在这个社会里面，每个人的边的数目完全决定了他的命运（越多越好）。三角形是平民阶级，等腰三角形为普通工人和战士，地位比等边三角形低下。正方形作为专职阶级——比如说这个故事的英雄，而五边形更加受人尊敬。身为贵族，六边形地位又要比五边形高，如此类推。社会的统治者是圆，职业是牧师。地位最低的是女人，仅仅为一条线段（换种说法，也可以看成非常细长的三角形），毫无疑问是最糟糕的状况。

不难发现艾博特所揶揄的文化背景，因为他写作之时，正流行维多利亚时代的束身风气。他不仅仅描写了一个荒谬可笑的阶级社会，同时将其背景设置在空间中孤立的长条中——一个岛国，就像英格兰那样——借此讽刺同胞们的闭塞，没有能够正视自身。即使当正方形发现了真相，试着公之于众，国民却仍不肯相信高维空间的存在。讽刺的是，多亏了凯莱、克利福特、西尔维斯特、欣顿和其他人，维多利亚人成为了第一批深思高维意义的大不列颠人。从这个角度上来看，他们并不像艾博特嘲笑的那样思想封闭。⁵⁵

正方形意识到超出他们平面的生命的呈现方式，类似于宗教上的体验。这个发现发生于第三个千年（按照《平地》中的日历）结束之际，一个伟大时代到来的前奏。同妻子交谈的时候，正方形突然“能够理解房间中的存在”。伟大的圆“看上去用一种不可思议的方式改变了形状，他见过的任何规则形状



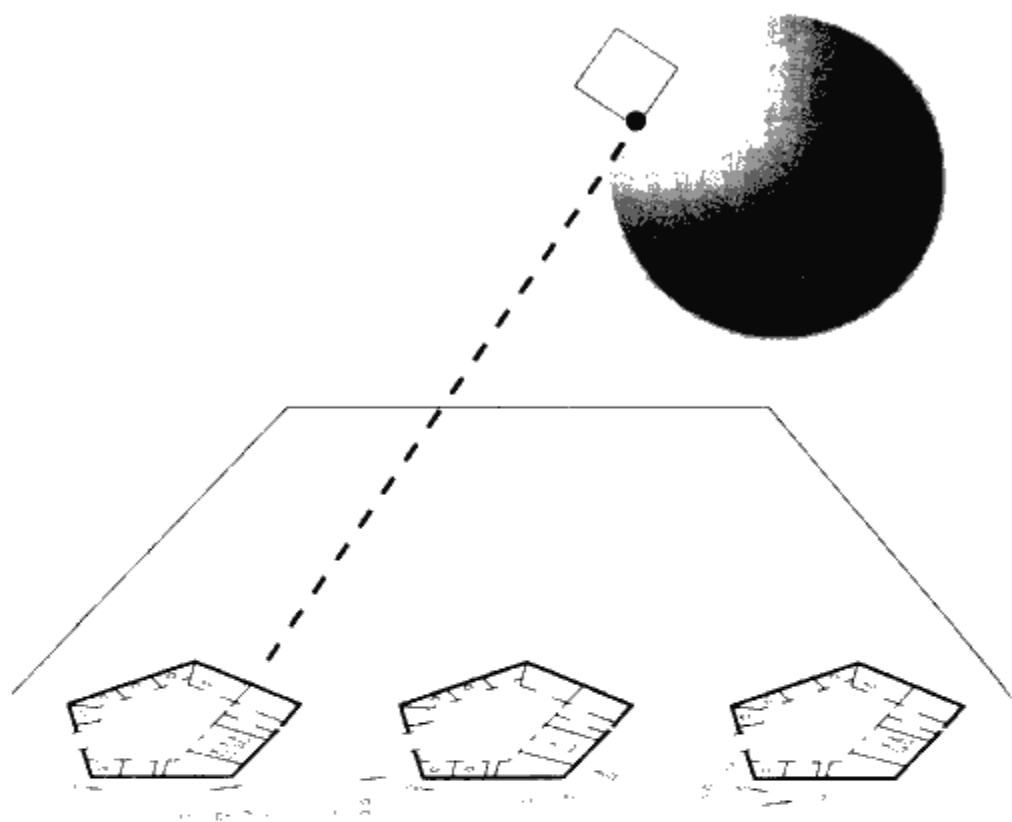
也是如此。”¹⁸

圆又变成了球，并且穿过“平地”的平面浮了起来。球上升的过程中，在平地的视角看来，它的半径不断增大，就像把面包圈切成薄片。正方形目不暇接了，他无法看清所有的一切，所看到的只是连续的部分。这种感觉类似于欣顿用来展示超立方体的方法。

球宣称他是来传达三维空间的真理，然后任命正方形作为他的使徒。正方形表示怀疑，直到球让他脱离表面来到空中。在二维国上空飞翔的过程中，他就像被彼得·潘（Peter Pan）带着的文黛（Wendy）^①一样开怀，他看到了房子、树木和人们的全景图。但是，和文黛不一样，他既能看到任何东西外部，也能看到内部（包括每一个人）。空间中的好处是，任何东西都逃不出他的眼睛，从他公寓中的家具到妻子的身体内部。一眨眼，这个四边形的英雄就彻底信仰三维了。他希望能把这个好消息告诉他的同胞们。情理之中，他们认为他疯了，把他锁了起来。他在封闭中残度余生，哀叹自己没能传播空间的真相，就像他在小说结束时悲叹的：

从此，我的信仰已无影无踪；就我所见，这千年启示也不足为道……我存在于希望中，竭尽所能，我也不知道如何才能找寻一条路途，能让维度在人们思想中深入，也能以此激发吾族勇气，奋然而起，不再囿于二维。¹⁹

① 英国小说家詹姆斯·巴里幻想剧中的角色，故事中的彼得·潘是一个永远长不大的孩子，他带领睡梦中的文黛以及她的两位弟弟远离伦敦，来到神奇的梦幻岛。



当球沿着第三个维度把正方形往上带，正方形看到的“平地”的全景图。从他这个优越的角度，可以同时看到他世界里所有人、地方和东西的里里外外。

事实上，正方形的工作，通过艾博特的引导无论如何都不可能不足道的。一代聪慧的读者已经把《平地》当作去探索神奇的数学概念的铺路石。《平地》也引来了许多充满创造性的续篇，每一部作品都强调了维度的一个不同方面。它们包括伯格（Dionys Burger）的《球地》（*Sphereland*），杜特尼（A. K. Dewdney）的《平面宇宙》（*The Planiverse*），以及最近的，伊

57



恩·斯图尔特 (Ian Stewart) 的《更平之地》(Flatterland)。

通向未来的高速公路

放眼整个 19 世纪，当高维的空间维度成了数学学科体系的一部分，就很少有作家寻思时间作为第四维的可能性。达朗贝尔和拉格朗日简单的建议完全被淹没——人们都沉迷于超空间和欧几里得几何的奇异之中。卷曲的空间，平行线走到了一起；秘密的灵魂孤土，这些光怪陆离的景致紧紧抓住了人们的神经，他们哪来的空闲把目光投向时钟呢？

到了 19 世纪后半叶，钟摆开始摆回来。欣顿的超立方体在空间中演化，艾博特的球穿过平面时，投在上面的圆不断增大继而缩小，这些构想强烈地说明四维空间的时间性。思想家重新将现实世界的外延与时间的持续联系在一起的日子，已经不远了。

1885 年，一个署名“S”的作者在《自然》上发表了一篇入木三分的文章，题目是《四维空间》。(物理学家詹姆斯·贝契勒 [James Beichler] 推断“S”实际上是西尔维斯特，因为他总是这样署名。²⁰) 这篇文章提出的“时间—空间”的融合预言了爱因斯坦和闵可夫斯基 (Minkowski) 的相对论观点。

我们必须……接受对于每一个连续的当下的时间，都存在一个新的三维空间；对一个给定物体历经一个给定时间的过程中，我们通过描绘出它在时空中连续位置的总和，就将得到四维体这一概念，我们可能将其称之为“超

立方体” (sur-solid) ……让任何一个人描绘出他从出生到现在身体的合集，他对时空中的超立方体就有个清晰的概念了。²¹

大约就在这篇文章发表的时候，就读于伦敦皇家科学学院 (Royal College of Science，现在成了帝国学院 (Imperial University) 的一部分) 的韦尔斯似乎第一次从他的同学那里听说第四维度。他 1866 年出生于伦敦南部的逻辑利 (Bromely)，是一个商人的儿子。韦尔斯 18 岁时开始上大学，他入学的第一个老师，受人尊敬的生物学家托马斯·赫胥黎 (Thomas Huxley) 向他介绍了革命性的新的进化论。韦尔斯开始受科学鼓舞，于是同他的朋友们一道，决定创建编辑一份报纸叫《科学学派杂志》 (Science School Journal)。1887 年 4 月，他的一个同学戈登 (E. A. Hamilton Gordon) 在上面发表了一篇文章，题目是《第四维》。韦尔斯开始迷上这个领域，从那以后很短的时间里，就开始致力于创作一部相关小说《永远的阿尔戈》 (The Chronic Argonauts)，最后也发表在上面。²²

韦尔斯成为了一个多产的作家，在他的许多中短篇小说中都探索了第四维这个概念。相关作品包括《隐身人》 (The Invisible Man)，《奇妙的旅行》 (The Wonderful Visit)，《戴维森眼睛的重大案件》 (The Remarkable Case of Davidson's Eyes) 和《普拉特的故事》 (The Plattner Story)。在每一个故事中，他都用四维的图示来验证那些奇异的现象，比如人们身体对光线透明，平行于我们这个宇宙的无数个宇宙，眼睛可以看到数千英里以外的东西，分解的逆向进行等。举个例子，



《普拉特的故事》，是一个类似于牟比乌斯带的传说，他写道：“普拉特左右两边奇怪的颠倒证明他已经脱离了我们的空间，进入了所谓的第四维。”²³

毫无疑问，韦尔斯对维度最著名的处理在《时间机器》中。这本基于《永远的阿尔戈》的中篇小说出版于1895年。讲述了一个发明家的故事，他制造出了一个完美的机器可以在时间中遨游。他用这个机器到几百万年后的世界旅行，遇到进化到那个时候的人类。回到维多利亚时代，他告之多疑的朋友他的这个发现，在他和时间机器再一次消失以前他就不知所终了。

这个时间的旅行者（他如此称呼）向他的朋友解释这个机器的工作原理和“S”的理论表述极雷同。韦尔斯解释道时间旅行是可能的，因为时间和空间都是相同存在的一部分。把超立方体（Sur-Solids）和时间—空间的观点同故事的一段进行比较：“这里有幅一个人8岁时的肖像，有幅15岁的，有幅23岁的，等等。所有这些都是明明白白的片断，告诉我们，这就是四维在三维中的呈现，四维的存在是一个确定下来的、不变的东西。”²⁴

59

韦尔斯是否读过“S”的那篇文章我们不得而知，或许他只不过熟悉时间被作为第四个维度这一普遍的概念罢了。有意思的是，在《时间机器》中，韦尔斯提及一段纽科姆的演讲；这段话不知怎地也出现在了《自然》上：“一些聪慧的人，正不断地提出为什么只有三维——为什么没有另外一个方向与这三个方向垂直？——并且甚至尝试去构建四维几何。纽科姆教授一个月左右前在纽约数学协会（New York Mathematical

Society) 详细解释了这个问题。”²⁵

引文来自《现代数学思想》(Modern Mathematical Thought)——纽科姆在纽约数学协会(在这以前的很短的时间内,它已经变成了美国数学协会)讲话以前的一个演讲,时间是1893年12月。在演讲中,他强调了数学家和物理学家对四维概念的理解的不同之处。纽科姆如此陈述:

就如同一个小男孩,在他学习的某个阶段,会经过二维到达三维,那么数学家也应该有相同的资质,能够超越三维到达四维……数学家如果被置于四维空间的一个球中,他们会简简单单地跨过它,就和我们跨过一个倒在地板的圆环那样容易。把第四维加到空间中,就会容纳得下无限数目的宇宙,所有的都彼此平行,就像我们把无数页纸张摞到一起。

从物理学的观点来看,第四维存在是否合理是个有趣的问题。我们能说的只有,到目前为止的一切观测表明,所有合理的结论与之相违背。在物理学中,没有比这更为普适完备的归纳了——三个条件固定了一个点。光的现象说明没有振动超出三维空间之外,即使是自激发射产生的光(luminous)。如果我们的视野之外存在另外一个宇宙,或者大量的其他宇宙,我们只能说没有证据表明它们会和我们的这个世界发生任何作用。²⁶

纽科姆的演讲预示了20世纪和21世纪理论物理的一些中心问题。数学角度上高维空间的存在能够带来什么样的较为科 60



学的物理意义呢？假设时间为第四维——如爱因斯坦和闵可夫斯基在以后展示的，那么会不会也有看不见的空间维度呢？如是存在的话，那它们的物理因果律是什么呢？如果没有任何的效应，那么我们怎么才能解释它们无法被观测得到呢？

在研究所有自然力的大统一理论过程中，这些问题被提到了最前沿。万有理论（Theory of Everything）要求能够精致优美地解释自然分化与统一的所有方面。这成了科学最有挑战性的目标。许多科学家相信，通过了解超越时间和空间的更高维，就可以完成这一任务。

物理学家的里程碑

——电、磁和光的统一

当一个非数学家听说“四维”这种东西时，一定会觉得不可思议地浑身战栗，这感觉与被某种超自然的东西唤醒没有什么不同。然而，我们所生存的世界确实是一个四维时空的连续统一体，没有比这个说法更为通俗普遍的了。

——阿尔伯特·爱因斯坦，《相对论》

自然的统一

自然界的鲜明对立和微妙联系是人们的研究对象。耀眼的闪电划破天际，深海游鱼发出柔和光线，它们共同打造出剧场般的华美景致。暴风雨逼近时，风声凄厉，而卵石坠入宁静的池塘，激起的阵阵涟漪又是那么的温柔。雪崩时的嘈杂惊心动魄，转瞬半个山头就倾泻而下拥入了无辜的山谷。而我们共赏的一轮明月，年年岁岁安详地起起落落，月华流过昏睡的人



们。我们尽情地感知这些多姿多彩的现象，但是我们的思想也注意到了藏在其中的相同的物理原理。

历久经年，科学已经知道自然力能够以多种面貌出现。同样是电力，可以无情地击倒一棵大树，然后等它成了纸浆被做成了纸张，又会把这些小纸片天真无邪地粘到一起。而一样的万有引力，仓促地将亿万吨的海水带到泊船的内湾^①，一会儿后又可能带给小孩们在沿着港湾的石头间跳跃的恬静之乐。强悍或者柔美，一样的演员面貌却迥然不同。

从牛顿时代开始，科学家就着手寻找方法来解释世界的统一和多样性。牛顿才华横溢地推导出相同的重力既可以把物体拉到地球上，又可以令行星忠实地沿着轨道围绕太阳旋转。他的成就引发了人们的兴趣，希望找到所有自然力的最根本的描述方法。以此为目标，始于18世纪，研究者开始探索电和磁的性质。

1785年，法国物理学家库仑（Charles Augustin de Coulomb）成功地用一个叫做扭秤的装置测量了电荷之间的电力以及磁极之间的磁力。他发现，就像引力一样，这两种力也都遵循平方反比定律。换句话说，就是在研究过程中，无论是电荷还是磁极，这些力都会随着相互距离的拉大呈平方关系地减小。比如说，如果你把两个带电球的距离增加一倍，他们之间的电荷作用力就会减到原来的四分之一；如果你同样地移动磁极，结果相同。

在接下来的几十年内，其他研究者例如安培（André Marie

^① 留作河流或港口专用的人工围起的区域，潮水变化不致使水位受影响。

Ampère), 奥斯特 (Hans Christian Oersted), 韦伯 (Wilhem Weber), 亨利 (Joseph Henry) 和法拉第 (Michael Faraday) 都基于波动电流的性质和磁力变化做了各种试验。根据他们的工作, 人们推断电磁之间具有深刻的联系。到了 19 世纪中期, 人们得到了关于电和磁相互作用的更具价值的资料, 它们开始呼唤第二个牛顿来揭示这些力的基本原理。

湍流

在苏格兰的一个未被开垦的荒原中, 一个乡村紧挨着一条曲曲折折的河流。詹姆斯·克拉克·麦克斯韦 (James Clerk Maxwell) 就在这个村子里的庄园中长大。自然而然的, 他很敏锐地觉察到大自然这出戏所呈现出的原始的壮美。河畔乱石纷纷, 这个男孩子就沿着河岸孤独地走着, 湍急的乌水 (Water of Urr)^① 从他的身边汹涌而过, 他细细地聆听潺潺的流水和悲咽的风不期而遇。他惊叹于青蛙的喉声, 它们正欢庆已经从小小蝌蚪神秘地转变过来, 各种自然力量之间的对话对他的吸引力远大于人们的闲言碎语。他天才的心, 总希望找到方法可以破译这些语言, 展示世界隐藏起来的模样。他的妈妈教导他万物之美源于上帝, 他深信不疑, 但是他想知道潜藏在这伟大背后的自然之理。

1839 年, 麦克斯韦年仅 8 岁, 母亲就去世了。从此他更加地退避到自己的思想中去。几年的家庭辅导之后, 他被送往

① 苏格兰邓弗里斯 (Dumfries) 和加洛韦 (Galloway) 之间的一条河流。



爱丁堡学院 (Edinburgh Academy)，他在那被同学嘲笑，他们给他取了个绰号“蠢蛋”来挖苦他。他们无法理解为什么他宁愿画复杂的图表，做机械模型，也不愿意玩普通的儿童游戏。

仅仅六年的正式学校教育，麦克斯韦就进入了爱丁堡大学，他的教授包括威廉·哈密尔顿，四元数理论的建立者。在那里，他年轻的兴趣逐渐变成了对实验科学和更高维数学技巧的热爱。不久，他便到剑桥去继续学业。

麦克斯韦沉浸在艰苦的大学生活中，这个过程中他以自己的努力获得了辉煌的成功。他总是被无拘无束的自然迷倒，虽然他每天的生活就像例行公事一样，平静得如同剑河 (Cam River)，但那咆哮的流水已经注入了他的血管，就像梭罗 (Thoreau) 和惠特曼 (Whitman)，他深陷于自然的伟力的联系之中。“啊，人的确是智者，”他在一个特别阴郁的日子写道，“将睁开惺忪的睡眼放眼昭然若揭的神秘。”¹

为了帮助人们解开电磁之谜，1855 年麦克斯韦将他非凡的分析能力转向电和磁方面的工作。那个时候，这个领域有两个主要的方法。一个基于牛顿的描述——力是“一定距离的作用”，因此可以想象点电荷（或者磁极）通过假想的绳子相互牵引，麦克斯韦发现这个理解太抽象了，因此将其束之高阁。

第二个方法，由法拉第开创，是通过相同的媒介的影响来描述电磁力——它们彼此可以通过蛛网般的连接，渗透到整个空间。这是场概念的基础，尽管法拉第并不熟悉数学，没有用数学的方法来表达。他偶然产生出一个念头：让铁屑和其他材料靠近电荷、电流或磁极系统（比如说，条形磁铁中的南北

极)，来描画出场的分布。法拉第在他的三卷本论文《电的实验研究》（*Experimental Researches in Electricity*）里归纳了他的结论。

麦克斯韦被法拉第的书鼓舞，被其中仿佛触手可及的物理性牢牢抓住了。麦克斯韦开始准备发展一套数学语言来描述法拉第的试验发现，他灵感突发，产生出流体这种类比。麦克斯韦意识到场线从一个正电荷出发（或者磁极的北极），就像喷泉一样向周围扩散开，因此，可以把正电荷看成“源”（Sources），把负电荷看成“水池”（Sink）。他借助流体力学的方程绘制电场结构，同时，他也用相似的技术来描绘磁场。如此一来，他证明了场的概念要比简单地把力看成一定距离的相互作用更加优越。麦克斯韦不久书写下这些诗行庆祝他的成功：

你的统治啊，力！已经结束。如今我们不再
留意你的作用；
斥力让我们回到曾经的地方，回到原来，
吸引力亦相同。²

1856年，麦克斯韦离开剑桥在阿伯丁马里夏尔（Marischal）学院获得了一个职位，然后又到了伦敦国王学院。他在那里发现了令人震惊的电、磁和光的联系。他发现了四个基本方程，可以表述电磁场如何相互作用，以及对于产生它们的电荷和电流的依赖关系。简单地说，电荷产生了电场；运动的电荷或者电流产生了磁场。变化的磁场产生电场，反之亦然。



通过求解这些关系——即现在的麦克斯韦方程，他推出了电磁波的性质：它们是振荡的电磁场。它们通过空间传播，就像交通堵塞的时候，汽车一辆接一辆的挨着，当有一辆车移动，第二辆也跟着前进一点。他计算了这些波的速度，发现波速和光速一样，因此，他得到了革命性的结论：光也是一种电磁波。

在麦克斯韦的时代，科学家相信所有的波必须通过媒介传播。海浪通过水前进，地震借助于大地传递。要是如此的话，电磁波通过什么运动呢？麦克斯韦等人推断，空间中充满了一种看不见的物质，叫做以太（aether），光，作为电磁波就是由以太的振动形成。

接下的日子麦克斯韦回到了剑桥，他帮助剑桥建成了声誉卓著的卡文迪许物理实验室（Cavendish physical laboratory）。在那里，他注意到同事们对于高维理论的热情日益高涨，他也开始对克利福特的努力非常感兴趣——克利福特希望能通过空间几何，表示物质之间所有主要的相互作用。他也记录了亚瑟·凯莱和菲利克斯·克莱因的高维工作。麦克斯韦甚至好奇他朋友彼得·泰勒（Peter Tait）的奇怪理论，在彼得·泰勒和巴尔弗·史特威（Balfour Stewart）合著的书《看不见的宇宙》（*The Unseen Universe*）中，他们推测人类的灵魂在以太中扭曲，就像亨利·斯莱德的结一样，它们只有在四维空间里才能够解开。麦克斯韦最后的一些诗中，有一篇很文雅地戏弄这些理论：

我的灵魂乃是一个繁绕之结

卷入流动的精致的旋涡之中
那是毗邻智慧的未知的天堂
你的衣服就如同量刑的坐椅
一切工具甚至海员的解索针
都拿来解开我这异乡的灵魂
不料那繁绕的纠缠一如当初
在四维空间所在的宽广之处
其中点缀着你繁星般的幻想
克莱因和克利福德用那平坦
有限无边的平坦填满了虚妄
开始思考无限现在终归灭亡³

以麦克斯韦的品味，他更加喜好实际的自然的理论，具有真实的物理类比。他喜欢把自己的电磁场模型描述成实际流体的扰动，他也是以这种眼光来看待以太的，而不是抽象的东西。有些讽刺的是，在麦克斯韦逝世（1879年）后的30年之内，科学家就摒弃了以太，以四维几何学为基础重建了他的理论。⁶⁶

理论之间的冲突

大多数情况下，麦克斯韦的电磁学理论是一个彻底的胜利，它统一了那时已知的自然界的三种相互作用中的两种。随着电和磁统一成为电磁力，就只剩下重力。此外，因为场的描述方式比一定距离的相互作用更加便利，它的引入有望将引力



也囊括其中。

麦克斯韦提出的概念给实验者带来了切实的好处，这些概念可以让人们预言光的本性。光作为电磁波，应该有很宽范围的频率，包括许多肉眼看不见的频率。毫无疑问，1888年德国物理学家海因里希·赫兹（Heinrich Hertz）制造了第一批无线电波，其频率要比可见光低得多。赫兹通过振荡的电流来产生电波，这也是现代电视和无线电广播的原型。红外、紫外、X射线等不可见辐射不久之后陆续被发现。麦克斯韦的方程也解释了辐射是如何产生压力的，这个结论于1901年被验证。

在麦克斯韦的理论中存在几个主要困难——不过和方程本身无关，而是关于对方程的解释，这是概念上的问题。麦克斯韦假设电磁波通过以太运动没有被实验证实，无论科学家多么努力去尝试，他们也没能检测出这种物质，而且，因为他们想象不出波可以不通过任何东西传播，所以他们只能希冀着用个什么方法能够把以太找出来。

还有一个比较困难的是麦克斯韦方程和牛顿动力学之间的关系。⁶⁷ 麦克斯韦的方程指出，当光通过一个给定的材料或者真空时，其速度必须完全为一个常数。无论什么人去测量它都应该保持相同的值，而不取决于特定的观测者。

而牛顿的运动定律决定了一个物体运动的速度依赖于观测者的速度。如果一个人运动得越来越快，任何在同一方向运动的东西就会相对地越来越慢。在一个约束条件下，如果观察者和被观察的物体速度完全一样，那么从他的角度来看，物体应该保持静止。

比如说，我们考虑两条步行道以相同的速度朝相同的方向运动。如果一个妇女踏上其中的某个步行道，同时她的丈夫踏上另外一个，他们互相之间看起来就像都站在一块坚实的石头上。如果那位妻子决定踏向另一个步行道，看起来，她就像在结实的地面上走。尽管牛顿力学要求所有运动类型都要满足这种情况，不过麦克斯韦关于光运动的杰出理论却对它说不。

1887年，物理学家迈克耳孙（Albert Michelson）和莫雷（Edward Morley）做了一个巧妙的试验，把这个两难的问题推到了中心位置。通过一种麦克斯韦建议的仪器，他们试图测量地球在光速的“以太风”中运动的效应。他们的装置比较了光沿着两个垂直方向通过相同距离的速度。因为这两条路径相对于地球在空间中（和以太中，人们认为光通过它运动）的运动指向不同，迈克耳孙和莫雷希望得到两个截然不同的值。他们预测了一个和牛顿相对运动概念相符合的差值。让他们吃惊的是，他们发现所测得的两个光速分毫不差，这证明了观察者的运动没有任何作用。因此，不像那个时代任何其他已为人所知的现象，光的运动违背了牛顿定律。科学史上，这是著名的负结果实验——被一遍一遍重复却得到相同结果的实验。

1892年，荷兰物理学家洛伦兹（Hendrik Lorentz）和爱⁶⁸尔兰物理学家费兹杰拉德（George Fitzgerald）独立地尝试解决这个矛盾，他们都提出因为“以太风”的压力，物体在运动的方向上产生紧缩。他们假设，沿着地球在空间运动的方向上迈克耳孙-莫雷仪器略微紧缩，这个“洛伦兹-费兹杰拉德紧缩”正好排除了牛顿力学的效应，显示出光速的同一性。

但是，研究者们没有办法解释，为什么能够产生如此令人



惊异的平衡。对于怀疑者来说，这种精确的抵消过于偶然。此外，如果光线是在真空中运动，这种效应的解释就显得牵强，而且事实上，没有人检测出以太的存在。麦克斯韦的物理和牛顿的物理，各自都取得了令人惊异的成功，不过看起来注定要发生冲突。

这些独特的困难召唤一位年轻人，通过新颖的方法和几乎没有偏见的观念，抓着这些令物理学分崩离析的假设，重新组织它们，然后在一个更加稳固的基础上将其合一。直到那时，人们才有可能去试图提出新的观点将自然统一起来。

追逐光波

阿尔伯特·爱因斯坦 1879 年生于德国乌尔姆 (Ulm)，随后不久与家人迁移至慕尼黑 (Münich)。16 岁那年，爱因斯坦进入卢伊特玻尔德高级中学，这时他已经开始思考一些决定他毕生事业的问题。其中的一个便是如何协调光速和牛顿运动定律。他想知道，如果你追逐光波，速度越来越快直到赶上它，这时会发生什么呢？⁶⁹ 难道它会看起来静止不动了吗？如果这样的话，那么如何解释光速不变的假设？

这些问题萦绕于爱因斯坦脑中，此时他正在瑞士联邦技术大学学习（坐落于瑞士苏黎世的理工大学，由德国始建），从 1896 年到 1900 年，他身处一个可以激起人们无限才智的气氛中，他找到了大量的机会和睿智的同学讨论他的一些想法，其中包括贝索 (Michele Besso)，贝索后来成为他终身的挚友和通信伙伴；还有米列娃·玛里奇 (Mileva Marić)，她与爱因

斯坦情投意合，最终成了他的第一位妻子。

当爱因斯坦拿到他的学位，他很沮丧地发现学校没有职位提供给他。幸运的是，格罗斯曼（Grossmann）帮助他找到了一份工作，在瑞士伯尔尼专利局做一名小职员。他在专利局办公室的工作效率很高，所以他有足够多的时间去沉思光波的两难问题。最终，26岁那年，他找到了令人耳目一新的解决方法，也就是狭义相对论。

爱因斯坦的理论既没有抛弃光速不变，也没有忽视速度的相对性，此外，它并没有求助于以太假设，他的理论只是摒弃了牛顿的绝对时空观，取而代之的是依赖于观察者相对速度的测量。

牛顿的概念中，空间并不是动态的，而是一成不变的，无论环境如何，它永远也不会改变形式。结果，就像田径跑道上的码线，它提供了固定的标准用来测量运动。更明确地说，三维空间具有在三个方向上相互垂直的“田径跑道”： x 轴（对应于长）， y 轴（宽）， z 轴（高）。我们可以用这三个维度的尺寸来指定宇宙中存在的任何物体所处的精确位置。无论它在哪里，它的 x 、 y 、 z 坐标——每个方向对应的位置——具有精确的客观的值。

时间，在牛顿物理中，类似于提供了一个固定的标度。事件发生的周期，对于任何人来说，都应该有一个精确的相同的时钟。对宇宙中的任何领域，其秒、分、小时应当与其他领域一样，这就定义了一个普适时间（Universal clock），用 t 轴标识。

爱因斯坦发现由于摒弃了绝对的时间和空间， he 可以把麦



克斯韦方程和牛顿的定律调和起来。他假设，观察者相对于他所测量东西的运动速度不同，长度和时钟的取值也因而不同，这样就优雅地消除了一切有关绝对光速的矛盾。

70

狭义相对论中，有种效应被称为时间膨胀。当观察者运动得越来越快，接近于光速时，他们的时钟相对于设置在地面上的时钟就会变得越来越慢，这个规则解决了追逐光波者的问题。如果一个赛跑者的时钟由于狭义相对论效应，不断地慢下来，那么无论他跑得多快，光对他来说还是会以相同的速度前进。因此，时间的膨胀决定了他永远也追不上光波。

为了更好地理解这个效应，我们可以想象一个有十排座位的音乐厅。一个钢琴家坐在舞台上，正在一遍又一遍地演奏《一分钟圆舞曲》（*Minute Waltz*）^①。因为某些原因，有可能别的客人一看到演奏的节目就退场了，所以你是唯一的一个观众。你在最后一排坐了会儿，然后你觉得如果坐得靠前一点离舞台近一点，效果会更好些，你就试着坐到第九排，然后到第八排，离钢琴家越来越近。

当钢琴家意识到他只有一位观众时，便决定调戏一下你。你每次移动到更加靠近舞台的一排时，他就放缓一下他的演奏节奏，当你接近舞台之时，他已经在很缓慢地敲击琴键了。

为了避免落下懈怠的把柄——按照传统《一分钟圆舞曲》必须在六十秒或者更短的时间内演奏完——这个钢琴家有所防备。他已经非常机灵的调整了房间中唯一的时钟——舞台上

① 又名《小狗圆舞曲》，肖邦《降D大调圆舞曲》的别名。作于1846年，Op. 64, 1。前一别名因此曲演奏历时一分钟（实际演奏常超过此限）；后一别名因乐曲开始段用快速的旋转式音型，如一只小狗旋转不息地追逐自己的尾巴。

的一座大钟，让钟的节奏和他节拍器的节奏一致。每次他慢下来，大钟以相同的速率慢下来。

你决定收集一些证据，来对他那愈发昏昏沉沉的节奏提出意见。每次你向前移动一排离舞台更近，你就记下演奏一遍的时间（你忘了带上自己的手表，只好依赖于大钟的显示）。因为钢琴家慢下来的速度和钟是一样的，每演奏一遍都是一分钟，丝毫不差。于是，与你的直觉相悖，你的“主观数据”表明钢琴家以一个固定的速度在弹奏《一分钟圆舞曲》。“时间膨胀”掩盖了让你产生正确感觉的证据，与此相同，它还会令追逐光波者察觉不到参考时间不断地变慢。

狭义相对论也包含了一个相对的效应，它颠覆了牛顿绝对空间的观念。爱因斯坦对洛伦兹-费兹杰拉德收缩修正后的描述⁷¹排除了以太的存在，取而代之来测量固定的观察者和随同运动的观察者之间的量杆（类似码尺的东西）示数的不同。因此，按照狭义相对论效应，对一艘速度充分接近于光速的飞船来说，船上的人看起来应该长 30 码的东西，对于地球上的观察者来说，只有 10 码。

1905 年，许多学者称之为爱因斯坦“奇迹年”。这一年，爱因斯坦发表了一系列的重要物理文章，包括《论动体的电动力学》（*On the Electrodynamics of Moving Bodies*），这篇文章中，他第一次提出了狭义相对论；还有《物体的惯性同其所含能量有关吗？》（*Does the Inertia of a Body Depend on Its Energy Content?*），这篇文章里他证明了质量和能量是等价的（他著名的 $E=mc^2$ ）。还有一篇文章，他以自己的理论为基础，计算了分子大小。他还写了关于分子性质的文章，即现在众所



周知的布朗运动；还有光电效应——有关原子行为的论文。这些论文中的任何一篇都让人交口称赞。当他于1921年获得诺贝尔物理学奖时，很奇怪的是因为光电效应而不是相对论，尽管后一领域的成就让他获得盛誉。

时空的先知

1907年，爱因斯坦曾经的老师，俄国籍德国数学家闵可夫斯基用超越传统三维的新颖形式，重写了狭义相对论。这个过程中，他不知不觉地令达朗贝尔和拉格朗日的四维概念得以重生，并与韦尔斯和匿名作者“S”的文章交相辉映。闵可夫斯基发现通过把时间定义为第四维，然后和空间融合在一起，形成时空的联合体，他可以更加简洁地表达狭义相对论。他还发现，麦克斯韦的电磁场理论也可以用时空的方法，用更直观的形式写出来。

闵可夫斯基1864年生于俄国的亚力克索塔斯（Alexotas）。8岁那年，他和家人移居到普鲁士（Prussia）的柯尼斯堡（即现在俄罗斯的加里宁格勒），他在那儿受到了广泛的古典式教育。历史学家盖里森（Peter Galison）推断，就在那个时候，闵可夫斯基可能开始接触柏拉图的著作，包括山洞寓言。⁷² 我们的感知仅仅是真理的投影，这一概念根植于闵可夫斯基的观念里。

闵可夫斯基进入了柯尼斯堡大学——康德曾经在此盛极一时，跟着威廉·韦伯进行研究，韦伯将电磁场理论告诉了他。闵可夫斯基对电磁的兴趣一直持续到1885年，他拿

到了博士学位，到波恩大学（University of Bonn）进行教学工作。在波恩，他开始痴迷于亥姆霍兹（Helmholtz）、赫兹（Hertz）和汤姆逊（J. J. Thomson）的试验，他们每个人的工作都和这个领域有关。他可能从书上了解过亥姆霍兹有关球面上的二维生物的观点，这类似于高斯和西尔维斯特的书虫。

闵可夫斯基对于高维的兴趣更多来源于在格廷根做教授的时候，他曾在瑞士联邦技术大学拘束地待了6年，他就是在这里教授爱因斯坦。闵可夫斯基是被天才的数学家希尔伯特（David Hilbert）吸收到格廷根去的，希尔伯特自己是被菲利克斯·克莱因任命的，而菲利克斯·克莱因已经将格廷根本已出众的数学声望又提升了一个高度。

1905年，闵可夫斯基和希尔伯特共同执教一个关于电磁理论的系列研习班，直到那时，他们才开始关注爱因斯坦非凡的发现。在希尔伯特的鼓励下，闵可夫斯基经过痛苦地挣扎重塑了他的概念体系，以此适应狭义相对论中重大而基本的转变。由于经年历久沉浸于格廷根神圣的传统中，他开始沿着四维结构这条主线思考。

除了爱因斯坦和希尔伯特，闵可夫斯基还被洛伦兹的工作以及法国数学家庞加莱（Henri Poincaré）的思想深深影响。如果爱因斯坦是狭义相对论之父，那么洛伦兹和庞加莱就是积极又充满好奇心的教父。尽管洛伦兹以他假想的以太理论为基础，发展出了一套变换可以让麦克斯韦方程无论在运动还是在固定的视角中，所得到的结果都相同，不过庞加莱意识到，如果有人把第四个坐标设为一个虚数（ -1 的平方根）乘以时



间，洛伦兹变换就是四维空间中的转动。

有意思的是，仅一步之遥洛伦兹和庞加莱就可以先于爱因斯坦发现狭义相对论。但是，洛伦兹太依赖于以太，令他无法摒弃绝对的时空；而庞加莱类似地相信以太的存在，但他更加强调从一个视角到另外一个视角的空间几何变换，他同时也注重维度和物理知觉的联系，坚持在理论上有可能通过训练眼睛，令知觉感受得到第四维。在庞加莱 1903 年的书《科学和假设》（*Science and Hypothesis*）中，他设想有人可以接受不同的光学刺激：“生物在这样一个世界通过训练其感觉，毫无疑问可以看到完整的四维空间。”⁶

不过，闵可夫斯基在四维空间物理可能性的追求上，要比庞加莱大胆得多。与庞加莱不同，他开始相信四维领域的真实性，而三维的感知完全是幻象。相反，庞加莱写道“三维语言看起来比（四维）更加适合用来描述我们的世界。”⁷ 此外，庞加莱说过空间和时间是可分的实体，而闵可夫斯基却总结说它们是相同事情的不同方面。

完美的统一

1908 年，闵可夫斯基在科隆（Cologne）发表的著名的公开演讲中宣布了他的发现。这次物理讲座以一个异乎寻常的方式开始：“我乐意在你们面前展示的空间和时间的观点，它已经从实验物理的领域破土而出，迸发出力量。它们是彻底的。从此以后，空间本身和时间本身将注定消逝，成为泡影。只有它们两者的统一才能以独立的身份长存。”⁸

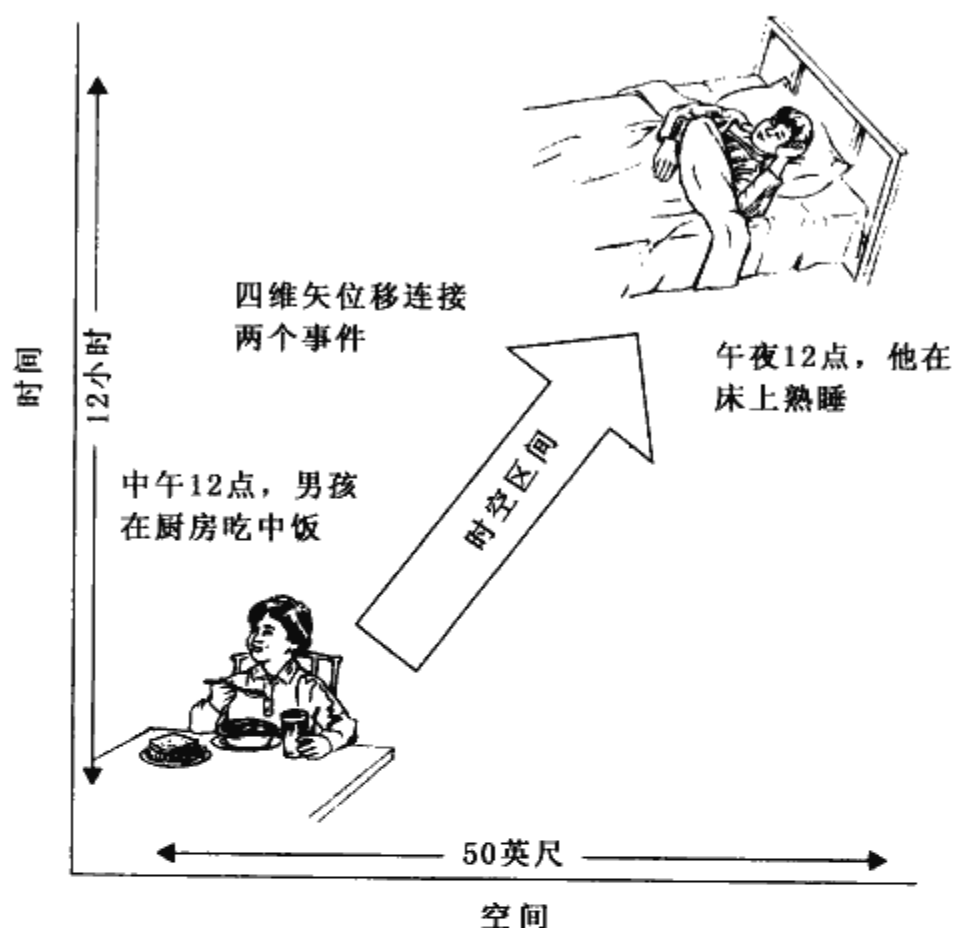
事实上，闵可夫斯基的四维物理重塑在物理学发展上具有让人震惊的效果。它带来了大量新的数学工具，借助它们科学家能够描述和分析物理事件。这些工具将相对论的目标简化，使人们能够以一个更为宏大的观点看待一些物理情形，包括彼此以不同速度运动的框架体系。

闵可夫斯基的相对论概念的作用范围称为**时空的流形** ⁷⁴ (*a space-time manifold*)，也被人们叫做**连续统** (*Continuum*)——所有时间上所有事件的集合。本质上讲，时空流形囊括了宇宙本身，溯及过去，遥伸至未来，我们的想像力才是其界限。它包括了永恒的已经发生的和将要发生的任何事情。

除了空间这一点，闵可夫斯基相对论中的基本单位是**时空事件** (event)。每一个事件代表了其物理发生的地点和时间，以一个四维数表示，称之为**时空坐标** (space-time coordinates)。由三个表示空间的数 x 、 y 和 z 组成空间位置， t 表示时间。我们可以把它们在一个**时空图表** (space-time chart) 中画出来，即相关事件按照它们坐标画出的四维图。

比如说，如果有人希望用时空坐标指出爱因斯坦出生这一事件，那么他只要提供爱因斯坦的出生地经度、纬度和海拔还有出生时间（1879年3月14日上午11点30分）就可以了。然后他可以在时空图表上，在相互垂直的轴 x 、 y 、 z 、 t 上描画这个点。因为在物理上不可能画出这样的四维图形来，所以在图表中可以有代表性的选择两条或者三条轴——比方说 x 和 t 。

物理上通常考虑成对事件的发生——开始和结束点——而不是单个的事件。这种情况下，我们可以在时空图表中描出每个事件，并考察开始事件和结束事件在空间上的改变以及时间



这是给出一幅简单的时空图例。尽管两个分立的事件：一个男孩子吃中饭，另一个男孩子午夜睡觉。这两个事件由一个四维矢联系，它的长度便是时空区间。它给出了时空中这两个事件的最短距离。区间距离可以是正的、负的或者零，这取决于人们考虑的事件的位置和时间。如果要以其他一个相对坐标系看这个图（比方说，在飞船上），人们只需要旋转坐标轴。

上的偏移，这个能够在图上用线段连接这些点表示，线段上加一个箭头以指示方向。在数学上，这个东西叫做**四维矢量**（four-vector）。

例如，假设汉斯把一个足球扔向他的朋友彼特。彼特站在

汉斯东面 20 英尺南面 30 英尺处，一个 10 英尺高的小山包上。两秒钟以后，彼特抓住了那个球，那么在坐标上 20 英尺、30 英尺、10 英尺和 2 秒就可以表示足球从汉斯到彼特位移的四维矢量，这四个数字被人们称为**矢量分量**（components）。人们就能够把汉斯和彼特的时空点用线段连接起来，得到这个四维矢量，在线段末端，指向彼特的那个箭头意味着在时空中足球运动的方向。⁷⁵

除了那样的偏移的表示，还有别的四维矢量。比如速度和加速度也是四维矢量，都具有四个分量。一般说来，四维矢量具有大小（长度）和方向（箭头的指向）。

然而，并不是所有的物理量都可以表示成四维矢量形式。⁷⁶一些量诸如温度并没有方向，如果一个天气预报员说道户外将有西北方向的 30 摄氏度就显得很蠢了。风速可以用这种方法，但温度就不行，因此，温度在数学上是一个没有方向的对象，称之为**标量**（scalar）。标量没有分量，仅仅是一个数。

第三个类型的实体（entity）^①，是微分几何领域里的概念，叫做**张量**（tensor）。一个张量本质上是一纸规则或者说是规则手册，它描述了将一个数学对象变换为另一个对象的特定方法。比如说，一个张量应用于一个四维矢量就可能将其变成另外的一个四维矢量，或者变成一个标量。并不是所有的规则都可能存在；数学家严格地规定了这些规则，并用它们各自进行特定的变换。不过，张量使用起来非常方便，这使得它成

① 数学家并没有对“实体”进行明确的定义，它就是“某个东西”，因此我们可以说，矢量是一个数学“实体”。通常用来表示抽象的定义、概念等。



了现代几何进行描述的重要工具。

张量经常用数组来表示，就像电子表格或者方格棋盘^①那样，由行和列组成。例如，一个将四维矢量变换成另一个四维矢量的张量可能用四乘四的方格数组成。每一列代表了原来四维矢量 (x 、 y 、 z 、 t) 中的一个维度；而每一行的变换，可以得到新四维矢量中的一个维度。函数（数学规则）位于每个方格中，告诉我们原矢量的分量如何经过它们的变换变成新的矢量分量。在运用这些规则的过程中，张量好比一个已经编好程序的机器，精确地执行它的变换职责。

在闵可夫斯基相对论空间中，最重要的是四维矢量、标量和张量之间的操作。假设我们希望在时空中测量两个事件的“距离”，例如，汉斯和彼特的足球历经的所有时空。这和传统的空间距离不同，那是通过毕达哥拉斯理论计算的。根据他的理论，两物体之间的距离平方等于它们 x 、 y 和 z 坐标差的平方之和，可是闵可夫斯基的时空不完全是一个欧几里得的几何空间，因此我们必须修正这个公式。

⁷⁷ 取代普通距离的是**时空区间**（space-time interval）这个概念，表示两个事件的最短路径。从数学上来说，它表示时空位移的四维矢量的大小。为了求出它，人们必须修改毕达哥拉斯的理论——空间坐标之差的平方和，接着再减去时间差的平方，得到的结果就是时空区间。

为了完成这个任务，人们可以利用一张称为**度规张量**（metric tensor）特殊的规则表。回忆一下度规是如何在特定

① 可以想象成围棋的格子。

的几何体系中计算距离的规则。张量，这个几何学中极为灵活的变换机器，用于这些公式再理想不过。通过赋予合适的表达式——即修改毕达哥拉斯理论，把时间前的正号改成负号——在合适的四乘四矩阵的度规张量中，人们可以把任何四维矢量转换成它的时空区间。

时空区间具有非常独特的性质。比如，它和距离不一样，对于两件独立的事件它可以为零甚至负值。零区间意味着这两件事都位于光线的行进线路上，而负的区间，或者类时的分隔，意味着事件可以以低于光速通信（比如相互掷足球）。正区间或者类空的分隔，说明事件之间无法相互影响。（两部电话同时在银河系的相反的两端响起来只能被认为是偶然事件，并非一个是诱因，一个效果，这是因为信号从银河系的一端到相反的一端需要一段时间，而不可能立即就从一端跳到了另外一端。）

洛伦兹变换并不改变时空区间，这是时空区间另外一个特性。这种情况下，洛伦兹变换包含了爱因斯坦时间膨胀和长度收缩的规则。无论在两个事件间如何膨胀时间收缩空间，只要遵从爱因斯坦的狭义相对论公式，时空区间就保持不变。

一个很好的类比是狂欢节中的抓阄转轮，假设一条通过轮中心的直线，指向转轮的十三个数字之一。无论人们怎么旋转轮子，也无论直线指向哪个幸运数，轮的半径（直线的长度）总是不变的。人们要在这种不变性上打赌，必然会成为赢家。

这是一个描述狭义相对论的很精妙的方法。在时空图表中表示出某个事件观测过程的起点和终点，将原点置于起点，接着在时间轴和空间轴的平面上，固定原点旋转时空图（相对运动发生的空间），这就像旋转抓阄转轮。根据转轮结束的位置，

78



四维矢量的空间和时间分量相应的收缩或者增长，但是时空区间（转轮半径）相同。当空间那部分减小，就会导致洛伦兹-费兹杰拉德收缩，时间那部分就会增加，从而产生了时间膨胀——这个效应让它们彼此之间相互平衡，维持区间不变。

当四维矢量的位置随着时空的旋转不断改变时，就构成了相对彼此以固定的速度运动时所有可能的观测角度。比如说，在汉斯和彼特的游戏中，四维矢量的一个位置代表男孩的视角，另外一表示是刚好停在足球上的跳蚤的视角，还有是一位商人坐在格廷根快车，飚飚经过时的视角。就像幻灯片在旋转的投影仪上一张张播放，每一个角度都有一个相对不同的画面，给出了时间和空间的不同图景。

闵可夫斯基不但在基本框架中包括了狭义相对论，他也发现了一个简化麦克斯韦四个方程的方法，可以让它们化成一个方程。闵可夫斯基通过定义电磁场张量和四维流，发现一个简单的关系可以广泛描述电、磁和光的现象。电磁场张量包含电场和磁场的所有分量，以四维矩阵的形式写出来的。四维流是一个四维矢量，而不仅仅是位移，它描述了电流和电荷。闵可夫斯基对麦克斯韦方程的精简在于将四维流作为电磁场张量的一个函数（专业地说，是其散度乘以一个常数），整个的光学和电磁学就在这个方程中表达出来，在一个人的拇指上足以写下；物理统一过程中，这是多么巨大的进步！

多余的知识

闵可夫斯基处理爱因斯坦理论的方法虽然很优美，但提出

多年后，爱因斯坦也没对此留下深刻的印象。只要有可能，爱因斯坦宁可选择繁复地处理物理问题，他认为闵可夫斯基的路线太过抽象。当爱因斯坦在瑞士联邦技术大学做学生的时候，他缺了闵可夫斯基的许多课，因此这位学院主任训斥他不勤奋。⁹ 闵可夫斯基说他“聪慧……但是像懒狗一样。”¹⁰ 他宁愿在物理实验室打发时间，看自然的真实运作，也不愿意在数学的抽象上花费精力。¹¹ 他无法相信更高级的数学在物理上能够有什么应用的地方，就像一个木匠听一位艺术家天花乱坠地讲述木头的美学。所以，当闵可夫斯基用几何的戏法，把狭义相对论调和进四维空间时，爱因斯坦根本不得要领。事实上，爱因斯坦觉得，诸如“第四维”这种东西，只会让人迷惑，就像他说的，是“多余的知识”¹²。当数学家接管相对论，他却哀叹自己却几乎看不懂了。¹³

就像历史学家约翰·斯塔赫尔指出的，爱因斯坦关于四维最初的理解在1908年，他和同事雅各·劳伯（Jakob Laub）从根本上重新推导了闵可夫斯基电动力学的四维结论的三维形式，并宣称闵可夫斯基的“工作需要读者掌握更多的数学。”¹⁴

闵可夫斯基发表了有影响力的讲话几个月以后，阑尾炎突发。他逝世时年仅44岁。据说，临终之时他感觉非常遗憾，因为相对论还在探索初期，而他却溘然长逝。¹⁵

不知何故，由于他的死，他的观念对以前的学生产生了巨大影响。到了1910年，爱因斯坦开始慢慢熟悉四维时空的方法，他在给物理学家阿诺德·索末菲（Arnold Sommerfeld）——后者曾把闵可夫斯基的工作拓展到了四维矢量代数学——的信中写道“对于四维空间中的形式关系的考虑，看起

80



来对我有些超前了……我〔以前〕和你的谈话中，在这个方面的表述可能有错误。”¹⁶

爱因斯坦的讲稿中，开始引用闵可夫斯基的工作并以此更为精致优美地表述狭义相对论。在1911年1月的关于相对论的演讲中，爱因斯坦谈到“〔狭义相对论〕理论在数学上费尽周折得到的非常令人感兴趣的结果，主要得益于让人伤感的英年早逝的数学家闵可夫斯基……对相对论中时间和空间坐标等价形式的追求……这让相对论的应用异乎寻常的便利。”¹⁷

有两个主要原因改变了爱因斯坦对第四维的看法。首先，他见证了它与狭义相对论的不断融合——比如说，索末菲的工作，还有马克斯·冯·劳厄（Max von Laue）1911年写的有关教科书。爱因斯坦评论冯·劳厄的书“些许杰出”¹⁸，这是第一本关于相对论的书，提供了明确的四维方法。

第二，爱因斯坦开始考虑四维几何如何才能帮助狭义相对论拓展为详尽的动力学理论。狭义相对论仅仅考虑了常速运动，它没有考虑加速度，而描述加速运动是动力学中关键的因素，一个没有加速度的理论就像汽车制造课程中没有提及发动机如何工作一样。此外，在讨论重力的时候，加速度扮演了关键角色，而重力恰恰是爱因斯坦急于在相对论中描述的。为了完整描述运动，爱因斯坦开始意识到必须借助更高级的数学的力量，包括他以前不屑一顾的四维方法。

第四维的肖像画

爱因斯坦就像皈依了新的宗教，为了不曲解教条，他毫不

动摇地努力着。为了防止人们对四维概念的神秘臆断，他开始坚称四维没有任何独特之处——这个主题贯穿于他为人熟知的著述中。比如说，很久以后，他和英费尔德（Leopold Infeld）写道“我们的物理空间，通过物体及其运动的感知的话，有三个维度，而位置可以用三个数字刻画。当下的事件便是第四个数……因此，事件世界形成了一个四维的连续体。这没有什么神秘的，对于经典物理和相对论来说，对世界的判定都是同样的真实。”¹⁹

不过，艺术上新的运动看起来暗示第四维是个革命性的奇异的东西，这一切都在爱因斯坦身边发生着。立体派（Cubism）是由毕加索（Pablo Picasso）和布拉克（Georges Braque）1907年在巴黎艺术家聚居地首先开创的，他们渴望从各种空间角度去描绘景象，它避开了维系了一个多世纪的文艺复兴的观念——从一个比较好的角度去表现物体。立体派尝试同时表现物体的前、后、边、顶和底，这和由乔托提出、列奥纳多完善的技术（透视）形成强烈对比，因为透视是基于外部世界自身。立体派的画有一个额外维度，类似于《平地》中在球引导正方形遍览平地世界的景观时，正方形的所见。马克思·韦伯（Max Weber）的《深入第四个维度》（*Interior of the Fourth Dimension*, 1913）中奇异的现代城市视角是立体派和超空间概念的紧密联系的例子。

立体派对空间的做法，未来主义也用来对待时间。未来主义是意大利的一群激进的艺术群体，他们相信在电影时代，静止的图片已经过时，他们不再试图捕捉现实的唯一的一张快照，而是把注意力放在连续运动的表现上。他们的作品，将眼



睛按着时间顺序正常观察得到的空间图景同时表现，就像将运动的图景的连续帧一下子呈现出来。比如说，贾科莫·巴拉（Giacomo Balla）1912年的画《狗带着链绳的动态》（*Dynamism of a Dog on a Leash*）描绘了一只狗的行走，不过混合了行走时需要用到的不同的部位，这是一只由嘴、耳朵、腿和尾巴杂乱组成的狗。

82 一个思想非常独立的法国艺术家，马塞尔·杜尚（Marcel Duchamp）在他的作品中架起了立体派和未来主义的桥梁。他精湛的《下楼梯的裸女》（*Nude Descending a Staircase*, 1912）描画了从不同角度随着时间流逝捕捉到的一位妇女的图像。乍看，作品似乎被凌乱的线条和交叠的形状弄得模糊不清，然后，不知怎么回事，她看上去就像有了自己的生命，如同惊悚电影中神秘移动的人像。感觉很奇怪，她是对捕捉到的时空图的解剖，就像闵可夫斯基不为人知地成了医学纪录影片导演一样。

杜尚最晦涩的作品开始于1915年完成于1923年，标题为《被单身汉剥光了衣服的新娘》（*The Bride Stripped Bare by Her Bachelors, Even*），又名《大玻璃》（*The Large Glass*）（不是所有杜尚的作品都和裸体有关），这是一首高维觉醒的颂诗，描绘急速旋转的运动，它运用了将诱惑想象成旋涡状的艺术手法。他的画独一无二地表现在一面洁净平坦的玻璃上，而不是画布上，杜尚希望它可以表现从玻璃中看现实世界的景观，就像是爱丽丝^①跨过玻璃之前所看到的。当作品安装的时

① 《爱丽丝历险记》中的女主角。

候，玻璃裂成碎片了，据传，杜尚不仅没有丝毫痛苦，反而容光焕发，评论道蛛网般的裂纹提高了作品质量。

许多历史学家曾经论证立体派、未来主义以及相关流派是对爱因斯坦相对论的直接反映。但是，这种态度因为一本书的发表发生了很大的改变，它是亨德森（Linda Dalrymple Henderson）的研究著作《现代艺术中的第四维度与非欧几何》（*The Fourth Dimension and Non-Euclidean Geometry in Modern Art*），亨德森证明了那个时代的艺术家并不熟悉爱因斯坦的发现以及时空概念。她指出，他们第四维的概念很可能源自19世纪和20世纪初期，这些源头要先于爱因斯坦的工作，包括欣顿、艾博特和韦尔斯的充满想象的作品；斯特林厄姆等人的图像描绘；诸如纽科姆、西尔维斯特和亥姆霍兹这些科学家和数学家的文章和演讲；通神论等超自然运动的精神信仰以及其他类似事物。

第二次世界大战以前，公众对爱因斯坦和闵可夫斯基的著作缺少了解，他们主要受1909年有关第四维的通俗文章的影响。这些文章被发表到《科学美国人》（*Scientific American*），以竞争匿名捐献人提供的500美元的奖励。许多的回复都非常有创见，覆盖了哲学领域的大部分，文章中分别提到了康德、高斯、欣顿、珠勒等人，但就是没有一篇文章提到狭义

83

相对论、时空、爱因斯坦或者闵可夫斯基。甚至下一个十年，他们的研究工作也没有被物理学圈子以外的人广为知晓。

至于杜尚，文化历史学家诸如琳达·亨德森和杰拉尔德·霍尔顿（Gerald Holton）已经将其对第四维的注意追溯到庞加莱的流行作品和另一位法国数学家乔夫拉特（E. Jouffret）



写于1903年关于四维几何的论文。杜尚曾经饶有兴趣地读过它们。历史学家完全是通过个人档案发现这个的，霍尔顿叙述道，“他明显研究过乔夫拉特。在他的笔记之一说过，他的习惯是记笔记并把它们放进一个盒子里，这些废纸不久就被结集成书出版。”²⁰

现代艺术家对爱因斯坦的工作不熟悉，因而兴味索然。但是，就像爱因斯坦这样具有革新精神和修养的人，也不清楚新式风格有何优点，他的整个一生，都强烈地热衷传统美术和古典音乐。此外，他断然拒绝在现代画和他自己的科学创造之间做比较。关于立体派，他曾经说道：“这个新式的艺术‘语言’和相对论没有任何共同点。”²¹

事实上，在立体派和未来主义的全盛时期，爱因斯坦正全身心地打造自己的杰作。逐渐的，他将引力和他的相对论合到了一起，达到了科学成就的巅峰。就像列奥纳多和米开朗琪罗在他们最具有创造力的时候一样，爱因斯坦殚精竭虑地工作，直到相对论完成。

第4章 | 完善引力

每一个生活在数学之乡格廷根的男孩，都比爱因斯坦更懂得四维几何。但是，尽管如此，是爱因斯坦完成了这项工作，而非数学家。

——大卫·希尔伯特 (David Hilbert)，

格廷根数学学院的领导者

最快乐的思想

爱因斯坦构造广义相对论——他的引力原理的西斯廷教堂⁸⁴ (Sistine Chapel) 的时机已经成熟，并且已经开始。大约同时，闵可夫斯基提出了时空的概念，爱因斯坦享受“[他的]生命中最幸福的思想。”¹ 很奇怪，这个快乐的思想与描绘一个人从他的屋顶掉下来有关。爱因斯坦假想一个人失足，然后掉到了地面。下坠过程中，他放开手上拿着的东西，他注意到(假设没有空气阻力)，东西仍然在他旁边，就像是静止的一样。事实上，他们以相同的速率自由落体——伽利略通过投下



不同重量的物体，首次发现并报道了这个效应。

爱因斯坦思想的独创性体现在一个称为等效原理 (equivalence principle) 的规则上。这个规则即，没有试验可以区分因重力而自由落体的物体和处于静止的同一物体。比如，
85 两个小女孩坐在游乐场自由下落的椅子上玩弹球游戏时，她们分辨不出这和在她们的家旁的人行道上玩有什么不同。

爱因斯坦意识到等效原理是发展引力的相对论的钥匙。在狭义相对论中，两个赛跑运动员以相同的速度前进，彼此看起来好像他们就是静止的，如果他们愿意，甚至可以镇定地聊天。在引力场中，只要这两个运动员以相同的速率朝着地球向下掉，这依然成立，比如说，如果他们同在一自由落体的电梯中（足够大，里面容得下一个跑道）。因此，自由落体的图景精确地模仿了狭义相对论条件，这在闵可夫斯基的时空中有严格描述。

这样的理解让爱因斯坦朝着表述引力的方向前进。爱因斯坦将无数种自由落体的图景，就像补缀棉被一样拼到一起后，他估计自己能够构造出宇宙的完整引力动力学。但是，用根什么样的线，可以创造出如此天衣无缝的结果——将每一个图景完美地与下一个缝合。

从 1908 年到 1911 年，爱因斯坦接连在苏黎世和布拉格大学就职，并且做了一些有关引力的相对论的初步实验，不过没有一个实验成功。这时，爱因斯坦意识到他需要通过更为成熟的数学框架来完成他的设计，包括运用四维时空几何学。但是在这方面，他缺乏专门的数学知识来完成任务。

爱因斯坦理论方面的努力在 1912 年初因为更现实的考虑

暂时中断。洛伦兹作为荷兰莱顿大学物理系主任退位，并将这个受人尊敬的职位提供给爱因斯坦。爱因斯坦极其敬重洛伦兹，视为科学之父。在一些物理概念上，他觉得受益于洛伦兹，因为那些概念组成狭义相对论的基石。

然而，爱因斯坦不得不拒绝洛伦兹提供的工作机会。他已经许诺格罗斯曼回到苏黎世并在瑞士联邦技术大学就职。因此洛伦兹只好取其次，让澳大利亚物理学家保罗·埃伦费斯特 (Paul Ehrenfest) 担当莱顿的职位，他不久在维度理论的发展中扮演了杰出的角色。

86

爱因斯坦和格罗斯曼曾经同窗多年，他们维持着亲密的友谊。作为一个熟练的数学家，格罗斯曼 1907 年回到了瑞士联邦技术大学，第一次以几何学教授的身份加入到了教员中，然后成了数学和物理学院的院长，他年仅 33 岁就被任命为院长，这在那个时候很不寻常。这位年轻的院长第一个决定就是邀请爱因斯坦加入，担任物理学教授，爱因斯坦因为妻子米列娃非常留恋这座城市，也急切地想回到苏黎世。

当爱因斯坦成为瑞士联邦技术大学的教员后，他继续相对论引力工作，但是他在数学上如何也上不了路。他对完成他的理论近乎绝望，于是只好向他的朋友求助，“格罗斯曼，你必须帮助我，否则我要发疯了！”据传爱因斯坦如此哀求到。² 格罗斯曼虽对物理持怀疑态度，但是他仍然急切地希望援助爱因斯坦，于是他把黎曼高维几何的奇妙世界介绍给了爱因斯坦，这是一个卷曲的，非欧几何的空间图景。爱因斯坦发现格罗斯曼的援助恰恰是他的理论进一步发展所需要的数学框架。

爱因斯坦只在瑞士联邦技术大学待了很短一段时间。1913



年，他在柏林大学身兼三职，担任普鲁士科学学院（Prussian Academy of Sciences）研究员，兼柏林大学教授以及将要筹建的威廉（Kaiser Wilhelm）物理研究所主任。尽管他喜欢住在苏黎世，但是在柏林没有任何教学要求，如此的慷慨让爱因斯坦没办法拒绝。爱因斯坦觉得快要完成他的引力理论，拥有无限的时间进行研究让他浮想联翩。他热情地接受了邀请，和米列娃以及他们的两个儿子 1914 年迁至柏林。

有一个更私人的原因让爱因斯坦决定离开苏黎世。大概那个时候，他已经慢慢地不满和米列娃的婚姻，他发现她“非常冷淡并且让人沮丧。”³ 他越来越倾心于热心的大堂姐爱尔莎（Elsa Löwenthal），爱尔莎住在柏林并且很明显怜爱爱因斯坦。到柏林后，爱因斯坦更加地亲近她。而她甚至对他的穿戴给予“母亲般的”建议，爱因斯坦过于投入研究，不觉忽略了这些方面。不用说，米列娃很不开心，在贝索的帮助下，她怀着对薄情寡义的丈夫的愤慨，携男孩们重回苏黎世。爱因斯坦独自搬到了一所公寓，更加努力地研究他的引力理论。

爱因斯坦完成理论的动力之一是意识到别的物理学家也正研究相同的问题，特别是格赖夫斯瓦尔德（Greifswald，德国东北部一城市，靠近波罗的海，位于斯特拉尔松东南）的古斯塔夫·迈（Gustav Mie）和赫尔辛基（Helsinki，芬兰的首都）的诺德斯特朗（Gunnar Nordström）。但是，爱因斯坦不久发现，迈和诺德斯特朗的模型缺乏必须的一些元素，从而无法成为成功的引力的相对论理论。迈的方法没有遵从等效原理，诺德斯特朗的理论是基于闵可夫斯基时空的引力的狭义相

对论——类似于爱因斯坦 1911 年就已经摒弃了的标量方法。对于 1914 年诺德斯特朗在此领域的文章，爱因斯坦和物理学家弗克尔（Adriaan Fokker）指出其中的缺点并且提出改进建议。⁴

1916 年，爱因斯坦终于宣布成功，并发表了广义相对论的完整形式。他在写给贝索的信中说，他觉得“满意但是疲惫不堪。”⁵他在这个项目上以健康为代价集中精力地工作，掏空了自己的身体，这导致了此后的数年内本来并无大碍的肝病和胃病恶化。对于那些人生的使命是以揭示宇宙的神秘胜过个人身心健康的人来说，这是非常不幸的职业风险。

为了科学，此种努力被证明完全是值得的。广义相对论是一组分外精致的方程，它们通过宇宙中任意区域的质量能量关系，将引力归结为此区域的时空结构。不像牛顿的引力用一根“隐形”线把空间中独立的有质量的物体联系在一起；爱因斯坦的引力纯粹为局域作用。所以，它类似于另外一个极为成功的理论——麦克斯韦的电磁场方程，在这个理论中，与宇宙中某一点有关的所有作用都只在这一点发生。

广义理论的机制就像是生产线，原材料在这条生产线上经过一系列的步骤被编织成美轮美奂的画面。这里，原料是宇宙中某个区域的物质和能量，时空自身是编织方法。此过程以一个方程（如何处理数学对象的规则表）开始，此方程与两个张量有关，它们分别叫做应力能张量（stress-energy）和爱因斯坦曲率张量（Einstein curvature tensor）。应力能张量描述了给定点的物质性质；例如，包含紧密恒星物质的区域，微量物质的区域，充满辐射的区域，甚至真空。爱因斯坦曲率张量：

88



它由其他两个张量组成，体现了同一地点时空形状的几何信息。不像闵可夫斯基模型有固定的垂直的方向和时间——组合起来像一个四维盒子——广义相对论的宇宙具有无穷多的方法让空间拉伸或者卷曲。空间的形状可以像个超球体（hypersphere，即四维球体）、双曲面（hyperboloid，即四维的马鞍）等无数形状。曲率张量将这些可能性都进行了分类。

因此，曲率张量可以按照**联络**（connections）这种数学对象表述。它们描述了四维矢量（从一个时空事件指向另外一个时空事件的有方向的线段）沿着不同的路径平行于自身传播时，是如何改变的。在闵可夫斯基的“平坦”（非卷曲）时空中，四维矢量沿着任何路径平行于自身运动本身是不会改变的；而在一个卷曲的时空中，它们的运动依赖于轨道可能发生戏剧性的变化。

为了理解这个效应，我们想象一对双胞胎 Marius 和 Darius。他们都有不同寻常的习惯——总是面朝北方。无论向东或者西走，他们依然面向北方，缓慢的侧身挪动。如果必须的话，他们可以这样保持几个小时、几天或者几个月，因为他们都是专业的竞走运动员。一天，他们挑战一场有纪念意义的比赛：从基多（厄瓜多尔首都，厄瓜多尔是南美洲西北海岸的国家，相当接近赤道），一直到走北极。每个人都选择一条不同的路线。

Marius 决定直接的朝北走。如果需要经过水域，他的朋友就会安排好一条船让他可以精确的往一个方向行进。他跨越了美国、加拿大，不停的向北边走去。最终，当他到达北极时，他停下来了，他发现自己面向俄罗斯。

另一方面，Darius 决定沿着赤道侧身移动，仍然一直面朝北方，直到他离开斯里兰卡（Sri Lanka）海岸，到达印度洋（他的朋友为他提供了船只以便他能够长期的水上旅程。）那时，从他出发的地方算起，他已经绕地球半圈了。他从那里开始向北，并跨越了亚洲。晚于他兄弟几个月后，他也到达了北极，但他没有面向俄罗斯，而是完全相反的方向。⁸⁹

没有一个弟兄改变过面朝方向，他们都从同一个地方开始结束于相同的地方，但是结束时他们却戏剧性的面向完全相反的方向，问题在哪里呢？这是因为地球的曲率改变了沿着地球表面的垂直坐标系的方向。比如说，极点的探访者们不久会发现北这个方向并非固定的（可以有点古怪地想象，在北极点有一座房子，而它的每一边都朝南开着。）因为类似的原因，当一个四维矢量通过卷曲的时空，一般来说沿着不同路径平行于自身传递有两个不同的方向，它们的区别可以用联络量化。

在此过程的最后一步中，联络可以用度规分量的形式表示。这些决定了所有可能的时空区间的值——即时空中所有成对的点间的最短距离。一个最简单的例子是闵可夫斯基时空，运用修正过的毕达哥拉斯理论后（空间分量平方和减去时间分量的平方），可以使用度规方法处理四维矢量。更为复杂的情景，例如超球体，将导致度规具有更加微妙的属性；当然也需要一套更加复杂的方法来找到与四维矢量联系的区间的大小。这些让事件之间最短距离的结构更为复杂，并引起了诸如当平行线之间的区间收缩时，平行线就会汇聚的效应。

这些机制最终的结果是宇宙中某个区域的物质和能量在那个区域的各点之间张开了一张特定的时空区间网络。这个时空



网络，在此区域引导物体的运动。对于时空和物质，约翰·惠勒（John Wheeler）简洁地说道，“时空告诉物质怎样运动，而物质告诉时空如何弯曲。”⁶

90 就这样，爱因斯坦以“最快乐的思想”开始了他史诗般波澜壮阔的旅行，这段关于坠落物体的旅程以引力的全新概念的出现而达到高潮。

被遗忘的方法

爱因斯坦弄出了数学上成熟的理论还不够，他必须在物理上找到证实理论的方法才能够打败他的竞争者。他提出了一系列意义非凡的检验方法，包括水星运行轨道的解释（为什么水星围绕太阳的轨道随着时间的流逝慢慢向前移动）以及由于太阳引力导致的恒星光线的弯曲。

爱因斯坦的竞争者之一是诺德斯特朗的理论。但是诺德斯特朗使用的是标量而不是张量方法，他的模型也提供了广泛而多样的试验上的预测，比如说，光线将不会因为引力而发生偏转。爱因斯坦和诺德斯特朗都迫切地希望知道哪个方法才是正确的，虽然答案未完全知晓，诺德斯特朗就慷慨地承认爱因斯坦的方法。投奔另一个阵营对他来说也并不是一件难事，毕竟从学生时代开始爱因斯坦就是他崇拜的偶像之一。

诺德斯特朗生于 1881 年，他的职业生涯以工程师开始；随后他受人鼓舞想成为一名化学家。当他在格廷根大学念化学的时候，他又改变了想法。从 1906 年 4 月开始，经过一年的等待，他与闵可夫斯基的杰出思想不期而遇，于是决定将自己

的方向转到理论物理。回到芬兰，他就开始在狭义相对论领域发表文章，同时在赫尔辛基大学授课。他还用芬兰语写出了第一篇关于爱因斯坦和闵可夫斯基工作的通俗文章。

诺德斯特朗的大学同事困惑于他新的兴趣，他们没一个人熟悉相对论。作为沙漠中的海豚，只有朝着欧洲中心的科学海洋前进，他才能找到和别人开怀畅谈的机会。但是支持旅行的资金却很难弄到，对此他得到的回复为“你可以在家里研究第四维，无需任何国外之旅。”⁷

爱因斯坦将引力纳入到相对论中令诺德斯特朗很感兴趣，这激发他提出了自己已经精雕细琢多年的标量模型。1913年，他成功地搞到一些钱去拜访尚在苏黎世的爱因斯坦。尽管爱因斯坦不相信诺德斯特朗的方法，但那个时候他还是给予了足够的尊重，并在一个科学会议上介绍之，把它作为自己工作的可靠的候选方法。

接下来的年月，诺德斯特朗毫不含糊在他的理论中加入了另一个维度。早于卡鲁扎五年，他就迸发出引力和电磁学在更高维度上统一的想法。因为其理论建立在一些有缺陷的基础之一——不久被广义相对论击败的引力的错误见解——他的统一模型无法自圆其说。那以后不久，诺德斯特朗就抛弃了他的这个推理线路，故也无人问津了。比如爱因斯坦从来没有引用过他的理论，可能因为那个时候他已经决定不再理会基于诺德斯特朗的引力方法，或者可能因为他和诺德斯特朗之间“毫无情谊”的缘故。⁸当卡鲁扎和克莱因的五维理论不久后被大量引用时，诺德斯特朗的文章完全被忽略了。直到1982年，派斯（Pais）才在他的爱因斯坦传记中提到它，然后在1987年，它



被物理学家彼得·弗洛伊德 (Peter Freund) 翻译成了英文。弗洛伊德的翻译发表于受人尊重的有关卡鲁扎-克莱因的文章汇编中，诺德斯特朗的贡献备受关注。

诺德斯特朗的文章题为《关于电磁学和引力场统一的可能性》(*On the Possibility of a Unification of the Electromagnetic and Gravitation Field*)，作为黎曼和克利福特的统一方法，这是一个很大胆的创新。在文章中，他合并了麦克斯韦的电磁场方程，并在五个不同轴的时空中，用他自己的引力标量理论以闵可夫斯基形式写出来了。接着，他不经意地说道“[这些] 方程的解释……说明我们有权把四维时空看成五维世界的一个平面。”⁹²

诺德斯特朗的五维世界事实上是个奇怪的东西，因为我们在它的四维时空中生活，在数学上，这个四维时空排除了任何东西，除了我们生存的“平面”。这种情形将使我们陷入诸如
⁹² 《平地》的困境中。但是，我们确实能够预言引力作用于光线上的效果，对那些东西，诺德斯特朗的世界和我们实际存在的爱因斯坦的宇宙简直没有任何类似之处。

广义相对论最终形式刚刚出来不久，诺德斯特朗又得到了一个激动人心的新工作机会——莱顿大学的研究员职位。去莱顿让他有机会进入主流物理学界，也让他有机会和埃伦费斯特带领下的众多出色的研究员探讨物理问题。

三喜临门

埃伦费斯特取代洛伦兹成了莱顿物理系的主任后，让人们

对物理理论的基础问题进行深刻的、百花齐放的讨论是他追求的目标，他也将其视为自己神圣的使命。他马不停蹄地邀请，甚至乞求客座教授们来参加他主办的系列讨论会，在那里他会接二连三地向他们提问。他是“物理领域中提问的世界冠军”，¹⁰他能诚挚率直地指出他们的推理方法中任何优点和瑕疵。他会让他们在演讲墙签上大名，这些签名至今仍然被小心翼翼地保存着，现在用来签名的是一面新的墙。为了激发讨论，他也试图在诸多场合召集他能找到的最有造诣的访问学者——包括爱因斯坦。

埃伦费斯特住在一个硕大的黄色灰泥粉刷的房子里，刚好与大学和城镇中心隔河相望。在风格上，它同周围的狭窄的砖房完全不同，打破旧习的思想家住在里面再合适不过了。在那里，他有足够多的空间来款待客人，并把他们吸引到睿智的讨论中去。

诺德斯特朗 1916 年夏到了这里，激情洋溢。他和埃伦费斯特在讨论电磁学、相对论等兴趣相同的话题中乐此不疲。温暖的傍晚，他们间或坐在公园外面，伴着汨汨的流水惬意地休憩，而脑子里思索着各种问题的新的解决方法。

诺德斯特朗短短两个星期的拜访，就让埃伦费斯特感染了“对维度的狂热”，并开始考虑迷人的问题。对三个空间维度来说（加上时间），自然的哪些方面比较独特呢，哪些方面更普适呢？他对物质的探究以这项记录开始：“在牛顿的三维空间中，行星的轨道是闭合的。那么在非欧几何的空间中，情形又会如何呢？”¹¹

时光飞逝，埃伦费斯特和诺德斯特朗讨论了麦克斯韦方

93



保罗·埃伦费斯特在莱顿宽敞的房子，它的风格与周围建筑截然不同。

他在此款待过爱因斯坦、克莱因、诺德斯特朗等著名物理学家。

程、引力理论和物理其他方面在高维空间形式中的特征。就像艾博特和欣顿一样，他们快乐地展望这个世界如果有更多运动方向将会是什么样子。每一个问题都给我们带来了新的认识，是什么成就了我们这个三维的栖息之地，而不是其他的可能性。

埃伦费斯特对空间性质的迷恋源于他的学术训练和他的婚姻。他曾经在格廷根大学学习过一段时间，在那里他受教于才华横溢的大师——诸如希尔伯特和菲利克斯·克莱因。他也享受着和妻子交流的乐趣。他的妻子塔姬雅娜（Tatyana）是位⁹⁴对几何感兴趣的数学家，她为中学和大学写过几何的教法。¹²他们在菲利克斯·克莱因的课上邂逅，从那以后开始相互影

响，他们一道努力工作也让子女们都对数学产生了浓厚的兴趣。

埃伦费斯特的孩子们很不寻常。他们在家里接受教育，很小的年纪便被睿智的思想熏陶。他们曾经通过玩一种“讨论会”的游戏取乐，在游戏中，他们在一起作“演讲”。¹³他最大的女儿曾经把她的洋娃娃藏在一个双曲面的纸板模型中。

这些趣事至少给一位特殊的在此暂住的客人留下了深刻印象。爱因斯坦——埃伦费斯特亲爱的朋友，品味着有幸和他们在一块的美好时光。他总是觉得自己极其受欢迎，无论他什么时候来拜访，总可以享受作为孩子们“叔叔”的快乐，沉浸在这与他已经疏远的其乐融融的春天般温暖的家庭氛围中。约翰·斯塔赫尔评论道：“如果爱因斯坦在生命中有个父亲般的人，那就是洛伦兹。如果有个兄弟般的人，就是埃伦费斯特。”¹⁴

爱因斯坦怀着不一样的喜悦，告诉他的“父亲”和“兄弟”引力的四维相对论理论完成了。1916年9月，爱因斯坦旅行到莱顿，在第一次世界大战最紧张之时，获得旅行许可是非常困难的。他和埃伦费斯特待在一起，一同驱车看望洛伦兹，“洛伦兹正微笑地望着爱因斯坦”，埃伦费斯特后来回忆道，当时的情景“极像父亲赞赏他心爱的儿子”。然后爱因斯坦怀着无与伦比的满足感回到了柏林。

在1917年5月，埃伦费斯特开始准备解决有关维度在科学中作用的问题。他的成果是一篇名为《用什么方法可以表明在物理的基本定律中空间具有三个维度？》的论文。¹⁵从许多方面看，这都是一篇卓越的文章，一篇精明的物理学家所写的文



章，他和爱因斯坦一样急切地想探索自然最深层次的问题。埃伦费斯特的传记作者克莱因（Martin J. Klein）评论道，“这篇文章的风格完全不同于大多数物理论文。当你读它时，你会感觉到它来自一个活生生的人。”¹⁶

埃伦费斯特陈述空间维度无限宽广的可能性，并问道基于什么样的物理基础我们才能够将它们彼此区分，什么是物理上的不同，比如说，一个三维空间和一个七维空间在物理上有何差别。埃伦费斯特以此开始了他的文章。

95

随后他列举了大量的例子，包括引力和电磁力，并且考虑若不是在三维空间中它们的行为会如何。他检验的第一个问题是行星轨道的稳定性，计算出在恒星引力的影响下行星的运动后，他证明了只有在三维空间这个运动轨道才是闭合的，有稳定的可能。更高维中，行星要么螺旋运动然后与它们的太阳火焰四射地相撞，要么像是被冻结了的团块渐行渐远。无论哪种情形，都缺乏一个稳定轨道让行星舒服地呆着，而我们也就不在这里了，这种论证类似于康德对世界维度的引力解释。

埃伦费斯特考虑的另外一个问题是维度如何影响原子的稳定性，这和丹麦物理学家尼尔斯·玻尔（Niels Bohr）1913年提出来的原子模型有关。根据玻尔的理论，电子的轨道以不同距离绕原子核运动，极像行星环绕太阳。但是，不像太阳系那样，电子轨道之间有分立的间距；没有任何电子可以在轨道之间存在。如果一个电子跳（跃迁）到更低的一个轨道，它需要借助特定能量来完成，即一份量子化的能量。电子能达到的最低能级称为基态（ground state）。对于一个给定的原子，电子通常和原子核保持固定距离，以避免电子塌陷到原子中消亡，

以此保证原子的稳定性。

埃伦费斯特发现玻尔模型的行为方式和三维空间的行为迥然不同。在三维空间下，他计算出并不存在最小化能级，为电子维持稳定的轨道提供保证，若没有最低能级的约束，所有电子都将掉进原子核中，从而无法维持稳定。但是，如果不是三维空间，我们这个世界的东西都将很迅速地分崩离析。

此外，即使实物可以以某种方式存在于高维空间，它们也无法通过光信号沟通。它们发射的电磁波和其他所有的波，将无法稳定地以脉冲形式传播，而会不携带任何信号的发散。因此，简而言之，这样的存在将是残酷的、孤独的和难以置信的轻瞬即逝。

以学术引用和被其他文章参考的程度来衡量的话，埃伦费斯特这篇见解深刻的文章在那个时候的物理界并没有产生很大的反响。这也可能是因为战时环境所致，所以这篇文章相对难⁹⁶于理解，就好像把地球带到高维的混乱中，减少了科学家之间的沟通，也或许这个主题看起来太哲学化了。无论如何，因为这篇文章，埃伦费斯特树立了自己在维度方面专家的形象，他不久也在维度方面对爱因斯坦等科学家都提过建议。

牵强的“交响曲”

爱因斯坦的莱顿之行让他从柏林的与世隔绝中暂时解脱。和瑞士联邦技术大学相反，他在柏林很少有机会与人合作，无论是在大学还是学院，他都无需每天向办公室例行报到。因此，他经常套着旧衬衫，吸着烟斗和雪茄在家工作，累了就拉



拉他的小提琴，这就足以让他感到非常舒适了。但是在那个时候，1917年，他消化道不适、肝病、胆结石和溃疡愈发严重，就根本谈不上舒适。1917冬到1918年春，他完全卧床不起，当他靠着营养品慢慢恢复的时候，爱尔莎对他悉心照料，为他烹制有助于消化的特别的饭菜。为了感激她无尽的爱，爱因斯坦打算和米列娃离婚和爱尔莎走到一起，这些希望来年便美梦成真。

一方面，爱因斯坦和爱尔莎结合，开始规划自己的一生；另一方面，他开始沉思与电磁场结合，完成引力理论，他希望因而可以从本质上解释所有粒子的存在及其相互作用。比如说，电子的性质，是否可以通过广义相对论推导出来呢？在完善这个想法之前，他收到了数学家赫尔曼·外尔（Hermann Weyl）的消息，外尔声称发现了他自己的统一方法。

97 外尔在数学物理领域是明星级的人物，他在格廷根受教于希尔伯特，然后在瑞士联邦技术大学任职，在那里他和爱因斯坦很短地共事过（很长时间以后，他们又走到了一起，共同在普林斯顿工作）。他对刚刚兴起的广义相对论的几何基础很感兴趣，并于1918年写了一篇关于此方面的关键的阐释文章，叫做《空间，时间，物质》（*Space, Time, Matter*），出版之前，他把样稿寄给爱因斯坦审阅。同时，外尔告诉爱因斯坦，“最近，我成功地从单共源极中导出了电磁力和引力”¹⁷，并询问可否寄给爱因斯坦描述这一技巧的手稿的复印件，他还希望以爱因斯坦普鲁士科学院院士的能力，将这篇文章发表在《普鲁士科学院的学报》（*Proceedings*）上。

一周以后，爱因斯坦回信了。爱因斯坦对这本书充满热

情，称赞它是“一本交响乐般的杰作”¹⁸。关于统一的方法，爱因斯坦最为激动，“你带来了我绝对无法招呼在一起的众多子女：脱离〔几何张量系数〕构建出麦克斯韦方程……毫无疑问，我急切地想看到你的论文。”¹⁹

外尔给爱因斯坦寄去了他文章的复印件，题目是《引力和电力》(*Gravitation and Electricity*)，这篇文章试图用修正过的四维空间矢量统一这两种力。外尔把广义相对论几何中的项乘上了一个新的因子叫做规范因子 (gauge)，它是坐标的一个任意函数。

规范在电磁场理论中和一个叫做电磁场矢势的东西有关。简单地说，电磁场矢势是一个四维矢（有方向），电磁场张量可以从它推导出来，即知道其中的一个量就可以确定另外一个量。物理学家长久以来就知道，对任何一个矢势的函数求导（微分运算），所得结果依然是相同的场张量。这个函数独特的性质让研究者想起厚度、压力和其他规范化（已制定测量标准）的物理量的变化，因此以“规范”命名这个因子。

这个定义太技术化，我们可以做个类比。想象一下现在出现了一种新的政府彩票，如果你选择了二十位正确的彩票数字，就中奖了。为了登记并获得彩票，你就必须打彩票代理机构指定的电话。为了方便人们，代理已经精心安排，无论用这个国家的任何区号都可以打这个电话，无论选择什么区号，人们都可以打通电话拿到票。为了易于比较，彩票号就像电磁场张量的详细数据；电话号码就像矢势，是获取数据的方法。最终，规范就像区号，附加在每个电话号码前面，打电话时完全没有区别。

爱屋及乌，外尔在广义相对论的几何中也加入了一个规范

98



项，而只需要引力模型加入一组新的方程，这样调和一下就可以导出电磁场的麦克斯韦方程。但是代价太大，因为外尔的非黎曼理论暗示，长度、时间甚至相对论中的直布罗陀海峡——迄今为止都保持不变的时空区间，都能被拉伸或者压缩一定的量。

外尔方法中，一个沿着两条不同路径、平行于自身的四维矢量的传输，不但可以指向不同方向结束，也可以具有不同长度。在我们的双胞胎试验中，想象 Marius 和 Darius 从不同的方向出发，再回到一起，他们突然发现一个人矮了一英尺，他们各自所携带的钟也会有类似的变化。此外，不像狭义相对论，不同的观察者得到不同的时间读数，外尔方法中这些变化对所有的观察者都是一样的；它们是绝对的效应。

爱因斯坦发现这些时间和尺度上的变动相当麻烦且没有物理性，不过，他对外尔的废寝忘食印象深刻，觉得这篇文章应该发表，不过要带上附言说明它如何脱离了物理的真实。爱因斯坦在一封信中表达了如此感觉，虽然他舍弃外尔的方法却称赞他的思想，“除了和真实情况不符，无论在什么情况下，它都是令人钦佩的思想成就。”²⁰

外尔非常感激爱因斯坦愿意发表他的文章，但是他很沮丧自己没有能力说服爱因斯坦其理论的正确性。“你对这个理论的否定像块巨石压在我的心头”，他向爱因斯坦写道，“我只清清楚楚地明白，与我相比，真实是如此的接近你。但是我自己对它始终不渝……如果最终你是对的，那么我只能苛责全能的主不顾数学上的合理性。”²¹

爱因斯坦和外尔来来往往地争论用这样的方法重写相对论

是否合理，但是谁也无法说服对方。随后，一个问题让爱因斯坦⁹⁹没能提交外尔的文章，它超过了八页的限制。爱因斯坦写信给外尔解释这件事并告诉他：“我研究过你的文章，不过我更加深信不疑，这个耗费你大量精力的工作有很大的问题。”²²

外尔的失望无可言状，他如此敬重之人与他竟有如此严重的分歧。“我迷茫于坚信你的权威还是自己看法”，他在一封写给爱因斯坦的为自己工作辩护的信中说。他以尖锐的措辞结束：“即使我们之间的战斧已经高悬，我仍然对您表示真诚的敬意。”²³

外尔的统一场理论从未流行，因为它有明显的物理上的缺陷。总的说来，尽管他的规范方法被证实属于现代物理特别是量子模型威力无穷的工具，但某些时候，它更像是开启另外一扇门的钥匙，而不是人们所期望的那扇门。

来自柯尼斯堡的一封信

就在爱因斯坦认为他已经从一个数学家的统一场理论中挣脱出来的时候，他又需要和另外一种思想角力。1919年4月，他收到一封来自西奥多·卡鲁扎——一位柯尼斯堡大学不知名学者的信。卡鲁扎请求爱因斯坦评论他关于五维空间引力和电磁场统一的观点。不像诺德斯特朗，卡鲁扎的工作以成熟发展的广义相对论为基础，何况，与外尔鲜明对比，卡鲁扎丝毫没有改变对广义相对论中基本原理，而只是增加了一个额外的维度来加强它。很明显，由于这样的扩展， he 可以从单独的一组关系，推出爱因斯坦的引力理论和麦克斯韦的电磁场方程。



爱因斯坦很感兴趣。不管怎么说，这个来自遥远的东普鲁士的卑微的大学讲师取得的成就，即便重点大学的著名教授也未必做得到。不过，爱因斯坦也是将瑞士专利局的工作日志束之高阁，开始他的工作从而在史册上留名的。他敏锐地注意到卡鲁扎的过去，想给这个不知名的研究者证明自己的机会。

但是爱因斯坦知道，一个可以检测得到的第五维空间的概念在物理上完全讲不通。就像埃伦费斯特曾经指出的，如果世界在空间上超过了三个维度，再加上时间，那么自然地很多方面都会和现在迥然不同。爱因斯坦很明白，许多物理学家都不习惯把时间作为第四个维度，对第五个维度，他们将作何感想呢？他们将会把第五维看成科学的领域还是灵魂的世界？

爱因斯坦回复了卡鲁扎一些有关他工作的问题，不久后爱因斯坦开始忙于一件至关重要的事情。1919年11月，两个英国团队报道了一个激动人心的结果，这个结果和广义相对论重要预言之一有关。他们的测量表明日食时因太阳引起的星光光线弯曲和爱因斯坦的估计吻合。这个发现被全世界的各大报纸竞相报道。爱因斯坦不再仅仅是一位在德国受人尊敬的物理学家，他成了世界上最著名的物理学家；鉴于他无与伦比的影响力，他将如何答复卡鲁扎充满前途、不同寻常的新理论呢？

奏响第五根弦

——卡鲁扎非凡的发现

难道我们定要拘泥于四维领域，在第五维的门口徘徊不前，不踏进去吗？啊，绝不！我们宁愿让雄心随着肉体的升华，一同翱翔。

——艾博特，《平地》

枕边故事

“爸爸，给我讲个故事。”小姑娘央求道。

101

西奥多·卡鲁扎烦恼不止。作为一名无薪大学数学教师^①（privatdozent），他要靠着课堂的上座率得以度日。学生来来去去，一枚一枚的便士被扔进了他街头艺人般的帽中。如果没有发表更多的文章，又该如何去找份固定的工作呢？但是他是一个梦想家而不是实干者，对于一些想法，他更愿意进行深入思考，而不急于将之付诸于期刊论文，他仅仅将那些自认为

① 日耳曼语国家大学教师的一种，其报酬直接学生学费。



最有价值的成果发表出去——平均每几年才有一篇。研究、读一本好书、修正几何模型还有和家人一同消遣，这些比学术上无止境的竞争更加让他满足。不过，无论如何，他还是需要稳定的薪水来源。

102 “爸爸，快点，我在等你呢。”

卡鲁扎享受着和孩子们游戏的乐趣并培养他们对知识的兴趣。就像埃伦费斯特一样，他想让孩子以扎实的数学作依托，接受广博的教育。但是，他并没有拘泥于传统的填鸭式教学，他的方法更为温和，他想的方法是在枕边给女儿讲故事：《平地》的故事。

而她女儿多萝西娅（Dorothea），正微笑着躺在床上，听着父亲继续告诉她一个平面王国的事情——那里全然是对一个更加伟大的世界一无所知的生物，他们蹦蹦跳跳地生活，根本不知道除了他们薄薄的平面之外的东西。这些臭虫……他若有所思。

臭虫？为了让他讲的《平地》世界活泼生动，也为了表明那是个二维世界，卡鲁扎把主角叫做臭虫。¹可能因为这些虫子在现实生活中也有特殊的意义，因为他和他的家庭非常熟知臭虫，诸如“晚安，睡觉的时候裹紧了，别让臭虫咬你”的话，可以说是他们家庭生活真实的写照。又或者他在转述中，参考了高斯和西尔维斯特的书虫或者比他们更加早的（前艾博特时代）——亥姆霍兹故事中的二维生物。

卡鲁扎的传记作者丹妮拉·伍威（Daniela Wunsch）推测西奥多·卡鲁扎可能已经因为父亲专业的原因，读过《平地》。他的父亲——马克思·卡鲁扎（Max Kaluza）²，是一位英国语

言文学家，他和埃得温·艾博特具有相似的背景，因而可能熟悉他的工作。于是，我们不难想象得到，《平地》的故事也会是西奥多孩提时候，马克思讲给他听的枕边故事。

普鲁士的英式童年

卡鲁扎（Theodor Franz Eduard Kaluza）生于1885年11月9日，德意志城镇维尔赫尔姆斯（Wilhelmsthal）。无独有偶，与他同道的大统一追求者赫尔曼·外尔也于同一天来到这个世界。卡鲁扎的父亲来自莱锡柏（Ratibor）的邻镇，其家族在这里的历史可以往上追溯三个世纪。他的母亲爱玛利亚（Amalie）是世袭贵族，也来自莱锡柏附近的村庄。无论维尔赫尔姆斯还是莱锡柏都曾经隶属于普鲁士的西里西亚（Upper Silesia）省，而现在为波兰的一部分。

卡鲁扎家族长期以来秉持教育和文化的传统。每一代都会造就至少一名教师、牧师或者重要政府官员。³ 一位久远的先辈曾作为大不列颠的弗雷德里克省（Frederick）的检察官，忠实地工作；另外一位，奥古斯丁·卡鲁扎（Augustin Kaluza），是名天主教的神学家，他研究西里西亚的自然历史，发表了一些有关这个地区的矿物和野生动植物的著名的论文。

103

马克思·卡鲁扎学术上的贡献令他从西里西亚的生活中脱颖而出。尽管他是一位地道的德国人，但是他快乐地沉醉于古英语的世界，在这儿他可以与乔叟（Chaucer）的古老故事紧紧拥抱，他编辑了乔叟的《玫瑰的传奇诗》（*Romaunt of the Rose*），这需要精通14世纪的中世纪英语。他熟悉古英语，写



了一些有关英语修辞史和语法史的书。学术上的高度评价让他在哥尼斯堡大学获得了工作职位，西奥多出生两年后，他就举家迁至此处。

对幼小的西奥多来说，哥尼斯堡是一个奇异的地方，洋溢着音乐与生机。它是一个硕大的区域文化中心，电影院、剧场大厅和歌剧院如雨后春笋般出现。这个智慧的舞台，不仅因为是康德的故乡而闻名，也因为其可以追溯至欧拉的数学传统而被人熟知：几乎每一个学数学的学生都多少学习过欧拉的哥尼斯堡桥问题。这个问题与城市中那些错综复杂地连接着海岸和小岛的桥梁有关，七座桥横跨普莱格尔河，欧拉证明了人们不可能一次不重复地走完所有的桥。

不过，伦敦的桥可以一次性地走完，毫不重复。多亏他父亲对乔叟的追求，卡鲁扎才得以有机会亲历这些桥。卡鲁扎非常兴奋能在研究访问期间和家人来英格兰旅行，这是一次难以忘怀的旅途，包括沿着莎士比亚式的足迹经埃文河（Avon）到斯特拉特福德（Stratford）的长途跋涉。卡鲁扎像 Artful Dodger（狄更斯笔下的一个年轻的动作敏捷的扒手）一样，很快就掌握了英语，年仅9岁便开始读狄更斯的作品。除了标准的英语，他学会了不同的方言和俚语。一次到匈牙利（Hungary）的夏季旅行，让他获得了匈牙利语的知识。最终，他熟悉十七种语言，包括立陶宛语，阿拉伯语和希伯来语，他可以完美流畅地说其中的七种。⁴

104 卡鲁扎的童年总的来说还是很快乐的。他是一个友善好问的少年，在知识的探索中他找到了极大的乐趣。数学对他来说变得轻而易举，但是许多别的领域他也同样拿手。他觉得，思

想几乎可以克服任何的困难。他亲自证明了这个想法：晚年，他读了一本有关游泳的书，结果第一次下水尝试就成功地游了起来。⁵

生命的精髓

卡鲁扎经常把这句话挂在口上，“在我们的社会文化中，最重要的决定是选择一个人的另一半和他的职业。”⁶ 不过这两样他都没有花费很多精力。1913年，他在哥尼斯堡大学开始进行数学物理和天文学方面的研究学习，在梅尔（F. W. F. Mayer）的指导下，他以一项名为 Tschirnhaus 变换为数学基础，进行理论推导工作。1906年，当他的的大脑忙于钻研研究课题时，他的心与安娜·拜耶（Anna Beyer）邂逅。安娜·拜耶是一个商人的女儿，同时也是他一位同学的妹妹。⁷ 三年后，他便与之结婚，与生命中的另一半相拥。

为了拓展数学方面的经验，1908年，卡鲁扎决定在格廷根大学待一年。在这个年轻的思想家的人生中，这是一次精彩纷呈的间奏。那个时候，格廷根的数学系实实在在地处于巅峰时期，传奇的菲利克斯·克莱因——尽管他已经从活跃的研究中退了下来，但他仍然是一位有影响力的教师和编辑。他那么受人敬重的坐镇格廷根，吸引了来自世界各地的天才。大卫·希尔伯特，他提携之人，在几何基础上有完全突破性的分析，并且正在发展现代物理的数学基础，他的无限维希尔伯特空间理论以后成了量子力学的基础。最后（但最重要的）是赫尔曼·闵可夫斯基正在为他革命性的时空概念和狭义相对论的重



要解释而奋斗。有谁能与这样的三人组相媲美呢？

更别说是任何时候，漫步于中世纪街道的数目众多的学生和访问学者，他们被高斯和黎曼的精神鼓舞，勇敢不懈地追求大统一。对于那些希望谱写宇宙交响曲的人来说，格廷根是无出其右的数学界的朱莉亚音乐学院^①。

先于卡鲁扎访问的数年内，格廷根的道路到处都是满怀希望的统一者。市场附近 Weender Strasse 咖啡厅的主人可以经常看见保罗和塔姬雅娜 (Tatyana Ehrenfest) 经过，他们把宝贝女儿放到马车上，然后谈论克莱因或者希尔伯特在某一天有趣的演讲；甘那·诺德斯特朗也许已经朝着演讲厅迈开大步，焦虑将要听到的闵可夫斯基的模糊的声音；在不同的时候经过一个相同的窗子，或许都可以看到赫尔曼·外尔陷入深思的信步，他正在冥思苦想一组棘手方程的可能的解。每一个这样的格廷根的居住者最终都对统一场理论和高维做出了重大贡献。

当卡鲁扎到格廷根后，他慢慢和外尔熟识，⁸ 毫无疑问，他们有许多相同的话题。埃伦费斯特和诺德斯特朗已经离开，因此卡鲁扎错过了与之相识的机会。对于每一个这样的思想者来说，很明显他们在格廷根的共同的经验帮助他们确定未来研究的方向。他们位于闵可夫斯基如惊雷一般的四维理论中——这是对爱因斯坦相对论透彻理解后的思想共鸣——最终，每一个人都为之启迪，也将其运用于各自的统一工作中，并取得了不同程度的成功。

^① 朱莉亚音乐学院是世界最顶尖的三所音乐学院之一，素有“音乐界的哈佛”之称。

1909年，卡鲁扎怀着新的使命，回到了哥尼斯堡。就像面对新鲜黏土的陶工，他等待机会塑造萌芽中的相对论形式。但是首先，他需要得到在大学教书的许可，当他通过资格考试后，大学便授予他这一资格。

他开始工作时年仅24岁。这个热情的新教师一头黑发，非常英俊，看起来比他的年龄还要小，他可以轻松地冒充一名学生。但是这对严格的行政部门是个问题——他把讲师和学生的划分看成不能突破的边界，他们很快就命令卡鲁扎终止授课，即剥夺了他授课的资格。当从主任那直接听到这个消息后，卡鲁扎这位执著的数学家愉快地计算了以后还有多少事可做。

卡鲁扎蓄了一丛浓密的黑胡子，但是这丛胡子让他看起来像是信奉犹太教的希伯来人而非天主教徒，这让他备受侵扰。¹⁰⁶ 有一次，当他从一个女孩旁边经过，这个没有礼貌的女孩向她的男朋友大声喊道：“快看啊，这绝对是货真价实的来自巴勒斯坦的家伙。”⁹ 很久以后，当这种烦扰演变成纳粹分子对其生命的威胁后，卡鲁扎决定将其剃除。他从1933年以后便没有了胡子。

众所周知卡鲁扎是一个友善但不是特别有活力的教师。数学家科内瑟尔（Martin Kneser）曾经上过卡鲁扎的一门课（在20世纪40年代的格廷根），他回忆道：“尽管他是一个慈爱之人，但我不认为他是一个富于启发性的教师。他的课，就我能回忆得起来的，没有任何出彩的地方，讲得真的不过尔尔。”¹⁰

他教书有一个与众不同的特点，完全依靠记忆授课。据



传，在他教书生涯中，只有一次参考笔记：将一个 55 位的数字抄到黑板上。¹¹

卡鲁扎的心不在焉也是出了名的——一个公认的危及他职业的问题。下面这个故事可以作为明证。一个晚上，卡鲁扎忘了上一节数论课。学生们等啊等，一直不见教师出现。最后，¹⁰⁷ 他们中的一些人放弃并决定去看一场卓别林的新电影。电影已经开始，他们想坐到剧院前排去。当他们往前走的时候，绊倒



西奥多·卡鲁扎，广义相对论的五维拓展在德国的创立者。这是他晚年的照片。

了一位老绅士，原来他就是卡鲁扎。卡鲁扎看过这个电影的广告，并且觉得应该很有意思，就完全忘记了他在那个晚上还必须授课。¹²

1910 年，Jr. 西奥多，卡鲁扎的第一个孩子降临。卡鲁扎喜欢开玩笑地说这个孩子的出生仅仅花了他一个马克（其价值只有一美元的小部分）。原因是大学医院按照传统免费治疗教职员工。当时卡鲁扎并不知道这个，他们就给他寄了一张不足

一马克的账单，用来支付邮费。¹³

多萝西娅，卡鲁扎的第二个孩子，六年后来到这个世界，没有她的出生费用的记录。毫无疑问，她不得不经受痛苦，因为在她生命的头两年，她的父亲被征兵到西线，参加第一次世界大战。¹⁴ 母亲安娜不得不独自抚养孩子，直到卡鲁扎于1918年安全地回来。

突如其来的高潮

战后，卡鲁扎继续在大学教书，在家中进行数学研究。那个时候，他已经在无薪大学教师这个职业上做了十年，急需发表更广泛的被人关注的文章，以此更进一步。他已经发表了一系列的文章，包括一个与相对论的旋转圆盘相关的问题，但是几乎不为学术界所知。

然而，他最主要的任务是重新熟悉他的家庭。那时聪明年轻的 Jr. 西奥多崇拜他，而多萝西娅几乎不认得他；他希望花上充足的时间来陪伴他们。他的儿子得到公开邀请，参加他的研究，无论何时他开始工作，他的儿子都会注视着他。

那个时候，卡鲁扎已经熟悉爱因斯坦的广义相对论方程。他就像一只老鼠玩弄新的玩具一样，把玩这些方程形式。他决心看看如果在其中加入一个额外的维度，会出现什么东西。突然间，他获得了令人震惊的发现：通过扩展爱因斯坦方程，他也可以重新推导出麦克斯韦方程。他意识到，第五个维度为一个自然的统一理论留有余地！卡鲁扎的儿子以后这样描述卡鲁扎灵感迸发的一刻：“他完全一动不动地坐了若干秒，然后尖

108



声私语并猛击桌子，接着他站起来但是仍然若干秒没有任何动作。接下来，他开始哼吟费加罗咏叹调的最后一部分。”¹⁵

卡鲁扎认识到结论的重要性后，将其整理成文——《关于物理的统一问题》，然后寄给了爱因斯坦。他以时间和空间的基础开始，一步一步详述了他的统一方法，他希望说服爱因斯坦和爱因斯坦所编纂期刊的读者，通过在广义相对论之树上嫁接一个额外的维度，可以得到出人意料的结果。意识到外尔在这个问题受到的突然打击，卡鲁扎尽力做得更好。

几年以前，在〔统一〕问题的解决方法上，外尔令人惊异地勇敢地向前突破，诞生出人类精神最伟大的思想之一。漠视困难，证外尔完成了深层次的理论。很理想地说，对于大统一的任务，人们可以想象出一个更加完美的实现方式：引力和电磁场从一个单独的宇宙常数张量中生出枝叶。我希望在这里展示，两个世界力量的紧密的联合在原理上看来是可能的。¹⁶

卡鲁扎通过加入一个额外的分量扩展度规张量（即广义相对论中的数学法则表，决定两个事件之间的时空区间）开始他的阐释。如果我们把四维度规张量看成四乘四的棋盘，每一行和每一列都对应一个维度（3个空间维度，1个时间维度），那么卡鲁扎简单地加入了1个额外的行和1个额外的列。修改过的张量具有排五点游戏（一种赌博性游戏）那么多的位置，可以放置25个独立的数学表达式。这比正常的多了9个，但它们并非都是独立的，四个额外的分量和四个额外分量是一

样的，再加上多出来的一个。这产生了五个相互独立的新的分量。

卡鲁扎令构成度规张量中的五个新的元素中四个等于电磁矢势的四个分量。可以把它们联想成“电话号码”，利用它们人们可以“拨通”电磁场张量，它是闵可夫斯基对麦克斯韦方程进行重新阐述后的基本角色。卡鲁扎不知道如何处理第五个新的度规分量，于是将其视为一个标量（不久我们将其称为 dilaton 或者 Brans-Dicke 标量）。他也得到了标准的应力能张量来描述物质和能量，并使用电磁场四维流张量构造它。又一次，人们像在棋盘中加入新的正方形，然后用新的东西进行填充。

接下来，按照爱因斯坦的步骤，卡鲁扎把新的项包括在内，计算了和完整度规相联系的联络。在标准的广义相对论中，联络将时空流形缝合到一起，产生引力的扭曲效应。但是，这个超大形式的度规产生了一个多余的联络项（和一些额外的假设），奇迹般地组成了电磁场张量的各个分量。接下来，卡鲁扎计算了曲率张量——所有联络分量的一个函数。类似的，这也产生出标准项，还有新的元素。

卡鲁扎急于检验他的新方法，他通过爱因斯坦的广义相对论处理了所有的东西，并对最终结果进行检验。他发现他的结果调和了两样东西，一个是引力标准方程的精确形式，另外一个麦克斯韦电磁场方程的精确形式。他的配方是有效的，这样调配能得到当时已经知道的自然界的两种基本力，这刚好完美地与物理界对其的期望相同——希望它能够非常简洁。

“瞧！”伟大的方程厨师举起盖子说道，“除了传统的主要



方法，如果在引力上覆以‘脆皮’，你得到了令人垂涎的甜点——电磁场模型，这可是免费的。”

但是就如卡鲁扎承认的，并非所有味道都很棒。他承认，在他的文章中“所有我们以前的物理经验几乎没有任何迹象表明〔第五维的〕的存在。”为了处理这个让人担忧的问题，他聪明地在自己的工作中引入“柱面条件”（Cylinder condition）的假设。它要求这个理论中，任何一个可测量的物理元素都无需依赖第五维，因此，第五维是无法检测的，它的存在不可能导致任何问题。“柱面条件”这一项是由于卡鲁扎的第五维是柱面而不是线性所导致的，这个方向的任何运动可以正确地回到起点，因而就好像高速旋转的螺旋桨一样觉察不到。发生于其他四个时空的运动则体现了自然的可观测的性质。那么他如何验证这个前提呢？他没有提供任何物理基础，而是断言它必须存在以抵消“引入第五维造成结果的严重偏离”。¹⁷

爱因斯坦对卡鲁扎理论的第一反应完全是积极的。“由一个五维柱面世界来得到〔大统一〕的想法我从来都没有想到过，看起来产生了一个全新的观点。就初步印象来说，我还非常喜欢你的观点。相比外尔理论在数学上敏锐的洞察，你的理论在物理上更有前途。”¹⁸

但是，当爱因斯坦开始细致地研究卡鲁扎的方程后，他看到一些问题。当他的第一封给卡鲁扎的信一周以后，他又写了一封，“我已经通读了你的文章，发现它确实很有意思。到目前为止，我没有找到任何不可能的地方。但是，总的来说，我必须承认到目前你的论证还是没有足够的说服力。”¹⁹

爱因斯坦不相信卡鲁扎细致思考过他理论的物理结论。爱

因斯坦着意问他一个关键问题，对一个带电粒子来说，如果同时处于引力和电磁场的作用下，会产生什么结果。它的行为是完全如实验所预测的那样呢，还是完全不同？他也警告卡鲁扎他的文章太长（就像外尔先前的成果，他的文章超出了不可侵犯的页数限制），并且建议他试一下另外的杂志。但是，爱因斯坦还是很友善地为他的文章在美国物理学会期刊上的发表敞开大门——如果卡鲁扎的文章在别的期刊无法发表。

两年过去了。重新审视卡鲁扎从未发表的工作，爱因斯坦意识到如果人们没有读到它，将会是一个损失。因此，他致信卡鲁扎：“两年前，我阻止你发表在引力和电磁场统一方面的观点，我再三考虑了一下，无论如何，你的方法看起来比外尔的包含更多的东西。如果你愿意的话，我将把你寄给我的所有文章向学术界介绍。”²⁰

卡鲁扎立即给爱因斯坦寄去了他的文章，一份经过修正的散发着墨香的文章；其中处理了爱因斯坦提出的一些问题，但是却总结道：“如我们所见，这篇文章的概念有许多问题，它们与物理和认识论相悖。即使我们面前堆积着这样的难题，我们还是难以置信，所有的这些关系，在形式上无与伦比的统一，只是因为一时头脑发热弄出的迷人的东西。”²¹ 爱因斯坦把这篇文章交给学术界，1921年12月它发表在物理学会期刊上。

接下来的几年，卡鲁扎的文章和它的作者一样被人遗忘。1922年，爱因斯坦和数学家雅各布·格罗梅（Jakob Grommer）写了一篇关于这个领域的简短的文章，说明不考虑应力能张量，卡鲁扎的理论在描述电子的行为时，不能消除数学上



的怪物——奇点。奇点总是物理学家的梦魇，因为它们产生了无法消除的无限项，从而不能继续进行计算。

忽略应力能张量对爱因斯坦来说很重要，因为应力能张量很明显包含了物质项。像克利福特一样，爱因斯坦相信，一个正确的大统一理论应该能从几何属性中产生物质，而无需特别把物质包含进去。

同年，爱因斯坦致信外尔，问他：“你透彻地思考过卡鲁扎的那些尝试吗？尽管他的理论最初打动过我，因为它最接近现实，但是它却没有成功地处理奇点中的自由电子。我相信，为了切实地前进，我们必须重新找到一个全面的、基本的自然原理。”²²

随后几年，爱因斯坦仅仅零碎地在统一场理论方面进行了一些工作，主要是对他人的工作发表评论或者进行总结。在此期间，他所发文章简短地介绍了一些工作，包括英国物理学家爱丁顿爵士（Arthur Eddington）的方法以及他自己的一个理论，这个理论与外尔和爱丁顿的想法稍有联系。除了与格罗梅的合作，这段时间爱因斯坦没有去进行第五维的工作。他自己弄出了一个模型，不过不久后便束之高阁，他给埃伦费斯特写信道：“我曾经有一个引力电子理论；非常漂亮但是疑问重重。”²³

数学家中的“灰姑娘”

112

与此同时，卡鲁扎一家生活日益窘迫，通货膨胀吞噬了他们微薄的收入，迫使他们把腰带系得越来越紧。为了满足基本

的生活需要，他们要举债度日。作为一个在优越的环境中长大的人，安娜·卡鲁扎因为穷困而陷入绝望，卡鲁扎的儿子回忆起他的母亲曾靠着食橱流泪，她的表情意味着几乎没有任何食物了。不过即使他们完全没有钱给孩子买玩具或者别的奢侈品，也能想办法弄些吃的。

即便处境最糟糕的时候，西奥多·卡鲁扎也一贯地慷慨大度。有一次，和他一样聪明的儿子拿到学校的特别奖学金。卡鲁扎明白如果他接受了奖励，一些贫困寡妇的孩子就将失去这些钱，不能上学。他没有片刻犹豫拒绝了奖学金，对此校长向他表示了由衷的谢意。

随着压力与日俱增，他确实需要更加稳定的收入来源。于是1925年，卡鲁扎把他的谦逊抛到一边，决定给爱因斯坦写信告之他的境况。他在信中说明了对教授职位的渴望迫使他不得不集中精力发表一些无味的数学文章，而把曾经热切追求的物理的大统一束之高阁。他对爱因斯坦如此诉说：“我现在只能为物理匀出一点点时间，因为我的数学工作花费了我大部分的精力，我必须努力发表大量的文章，以此让我更加出众——从而结束我褊狭的、不合意的、灰姑娘似的生活。”²⁴

爱因斯坦被这个可怜讲师的恳求深深打动。爱因斯坦希望如果卡鲁扎得到了一个更为稳定的职位，能继续朝着有前途的大统一的方向努力。爱因斯坦回复道：“我的看法依然。你在电学和引力之间建立关系的观点具有极大的原创性，并且应该会令学术界的同事们极为感兴趣。除了外尔-爱丁顿的想法，你的尝试是唯一应该认真对待的。我非常期待不久后你会找到时间和闲暇来重新处理这些问题，我自己被它们纠缠已久且徒



劳无功。”²⁵

113

在随后两年内，爱因斯坦试图联系别的教授，为卡鲁扎提供一个大学里的安稳工作。他曾热心地致信移民澳大利亚约翰·霍普金斯大学的物理学家赫兹费德（Karl Herzfeld）：“走了很长时间弯路，我认为引力和电学的内部关系现在已经被发现了，这和卡鲁扎若干年前（1921）在我们学术报道中提出的观点有密切联系。人们应该聘用他，为他提供过一个有利的环境继续工作。”²⁶

唉，可惜赫兹费德没有办法聘请卡鲁扎。他自己刚刚成为霍普金斯的教员，还没到可以提拔不知名的讲师的程度。最后，爱因斯坦得知基尔（Kiel）大学有一个空缺，那里的主任是阿道夫·弗兰克尔（Adolf Fraenkel），专于集合论的数学家，他相信爱因斯坦的判断，高兴地任命卡鲁扎为基尔的教授。终于，这位可怜的低薪大学教师找到了一份稳定的工作，灰姑娘的王子来解救她了。

为一个多维探索者寻找职位期间，爱因斯坦发现了另一位冒险者闯入了相似的领地。在1926年6月，保罗·埃伦费斯特给爱因斯坦发出了一份无法拒绝的邀请，让他来莱顿。为了吸引拜访者参加他“知识分子联谊会”，埃伦费斯特经常提供一份清单，上面写着已经到他那里的人，就好像在说“来加入我们的聚会吧”。这次，出现了奥斯卡·克莱因——一位非常有特点的客人，埃伦费斯特以他典型的方式赞美克莱因的优点，提到他是尼尔斯·玻尔（Niels Bohr）最喜欢的年轻学者。但是，因为家庭原因，爱因斯坦婉言谢绝了邀请。

无论如何，当他从格罗梅那里发现克莱因对多维模型的研究

究后，爱因斯坦变得非常好奇。他致信埃伦费斯特索要克莱因最新文章的复印件，克莱因亲自把它寄给爱因斯坦，并表达了他的喜悦，因为相对论的创建者对他的工作感兴趣。1926年9月，爱因斯坦读完克莱因的文章并回信埃伦费斯特说它“美丽并且令人印象深刻”²⁷。不过，他谈到对卡鲁扎柱面条件的怀疑，称它是非自然的。爱因斯坦受克莱因发现的鼓舞，也急切地希望以更坚实的基础重建理论，不久便继续他自己的工作，进行高维的大统一的研究。

第6章 | 克莱因的量子奥德赛

我们理论家面对的主要问题，确切地说，就像卡律布狄斯（Charybdis）和斯库拉（Scylla）^① 的故事所描述的那样。在这进退维谷的时候，英雄奥德修斯（Odysseus）^② 被迫掌舵……推测毫无疑问是理论工作的必要环节，要尽量以实验事实为基础，它让我们卷进思想的漩涡中——虽然不是卡律布狄斯弄出来的巨大漩涡，逃离简直就是一个奇迹；不过，若太依附于事实，以它们作为理论大厦的基石，也可能失败，要知道斯库拉有六个难以对付的脑袋。

——奥斯卡·克莱因，摘自《我的物理生活》

① Scylla and Charybdis 是一个典故，来自于希腊神话。在希腊神话里，斯库拉原是一个美丽的仙女，为英雄克劳格斯所爱，后来她的情敌女巫喀尔刻将她变成一个六头女妖，有12只脚，每个头有三排利齿，准备随时撕咬猎物，居住在墨西拿（Messina）海峡的岩礁上。在她对面的靠西西里岛的一边，住着另一个女妖卡律布狄斯，每天三次吞吐海水，形成巨大漩涡。这两个女妖严重危害着来往船只。

② 希腊神话传说中的人物。罗马神话传说中称之为尤利塞斯或尤利克塞斯。是希腊西部伊塔卡岛之王，曾参加特洛伊战争。

水手之旅

奥斯卡·克莱因是一个分外自相矛盾的科学家。作为一个¹¹⁴游历全世界的国际旅行者，却在相对隔绝的瑞典的学院里度过后半生。作为一个热衷实践的人，却仍然品味着最抽象的哲学发现，也把久远理论的概念发挥到极限。作为一个严肃勤奋的人，却拥有难以置信的讽刺天赋。作为第五维最主要的提倡者，却曾为它的终结而干杯欢庆。

在一本自传性的随笔中，克莱因拿自己的奋斗过程和奥德修斯比较。他视自己为一名水手，就像传说中的希腊英雄一样，在庸俗沉寂的实用和天花乱坠的想象这两个完全极端之间，掌舵前行。克莱因来往于斯德哥尔摩，这个属于他自己的¹¹⁵伊萨卡岛^①，他品味探索远方岛屿的乐趣，同时也喜欢家乡那份熟识的感觉。他享受新的奇妙的物理效应——就像在船上日日闲适的科学家，突然碰到深海中神秘的生物。

尽管他是一个极具创造性的思想家，但克莱因的“同时”和“几乎”最为著名：在量子物理中，他和沃尔特·戈登（Walter Gordon）分享相对论波的克莱因-戈登方程的荣耀，和帕斯库尔·约当（Pascual Jordan）一同让约当-克莱因矩阵和二次量子化理论光芒四射，也和仁科芳雄（Yoshio Nishina）并肩，以过人的才华推导出通过电子产生的高能光子散射公

① 希腊西部爱奥尼亚海中群岛之一，为希腊神话中奥德修斯的故乡。



式，更不用说他和卡鲁扎的贡献。他最出名的一些结果中，只有克莱因悖论——有关电子被势垒反射的效应，在他的名字前后才没有连接号出现。

而众多的“如果”已经成为传奇故事。据传克莱因推导出了薛定谔方程（这个方程是量子力学的根基）的一个初级形式，但是那个东西太麻烦，以至于克莱因无法弄清意思，所以就没有发表；他给出对强相互作用的描述，而这也预示了杨振宁和米尔斯重要的规范理论。当卡鲁扎-克莱因理论在 20 世纪后期被人认可并开始流行的时候，克莱因刚好离开了这个星球。人们仿佛能够听到他的灵魂高呼：“我原本就告诉过你们就是这样的！”

创纪录的合作、与真理擦肩而过都不会有损克莱因的贡献，相反，这说明他处于 20 世纪物理学的中心位置。就像海森伯（Werner Heisenberg）、薛定谔（Erwin Schrödinger）、狄拉克（Paul Dirac）以及其他的知名人士一样，克莱因抓住了原子行为这个黑盒子，并孜孜不倦地探索它神秘的内部工作机制。他创新的观点鼓励了许多人放弃原来的想法，提出了新的解释。

克莱因生命中的大部分时间都生活在诺贝尔奖的阴影之下。这是很自然的，因为他是某个物理学家组成的小团体中的成员，而诺贝尔奖恰恰由这个团体所在的城市颁发。不过除了国籍上的联系，他与诺贝尔奖的联系众多。他初次的研究工作是在诺贝尔学院展开的，由诺贝尔奖得主阿伦尼乌斯（Svante Arrhenius）指导；很多年，克莱因都是尼尔斯·玻尔的主要助手之一，而玻尔也曾获此殊荣；他同时更是沃尔夫冈·泡利

的亲密朋友，并与海森伯、薛定谔、狄拉克、马克斯·玻恩 (Max Born)、汤川秀树保持诸多联系，其后半生的朋友还包括阿卜杜勒·萨拉姆 (Abdus Salam)，这些人都是诺贝尔奖得主（或者可能的获得者，例如萨拉姆）。克莱因在诺贝尔委员会工作却从来没有得到过任何好处——即使他在科学和人道主义上显而易见的成就，综合到一起，也没有令他得此殊荣。如果诺贝尔颁发一个终身成就奖，那么将是为他量身打造的；如果有一个“诺贝尔奖”颁发给近乎完美的君子，那么他也会将其摘得。

116

克莱因难以言尽的慷慨和对于知识的狂热，在利文斯敦 (Livingstone)^① 和斯坦利 (Stanley)^② 都找不到源头。他的父亲，戈特利布·克莱因 (Gottlieb Klein) 是瑞典的首席拉比 (chief rabbi)，是一位具有大智慧的贤者，一位爱学习备受尊敬的信念坚定之人。出生于斯洛伐克的休姆尼城 (Humenneh)，安居于喀尔巴阡山脉，戈特利布·克莱因成长于一个接近于克莱因家族发源地的地方。他年轻的时候便离开家乡，在欧洲的中心徘徊，并游历至海德堡，在这个地方他拿到博士头衔。出于对全面广泛的知识的追求，他参加了由著名的科学家诸如亥姆霍兹、本生 (Bunsen) 和基尔霍夫 (Kirchhoff) 举办的讲座。完成犹太法学博士的学习后，他来到斯德哥尔摩，在这里领导一个犹太教新人协会，协会成员主要为德国籍人士。在那里，他娶了安东·李维 (Antonie Levy)，一位研究

① 赞比亚西南部城市。

② 福克兰群岛首都，位于大西洋上。是英国属地的行政中心。



东正教的德国学者的女儿。

虽然他开始不会说瑞典话，但是犹太法学博士拉比·克莱因不久在瑞典教会中，却拥有举足轻重的地位。克莱因成了瑞典国王的挚友，后者对宗教哲学格外感兴趣。克莱因持自由主义观点，并主张不同宗教信仰者的相互对话，这为他在教堂里博得了高级教士的友谊和尊敬。克莱因也慢慢结识瑞典主要的思想家，包括阿伦尼乌斯（Arrhenius）。克莱因满足自己长期的追求，即使没有一个孩子长大后信仰宗教，他也并不为此烦扰。他最大的希望和幸福是他们能够有意义的、仁慈地生活——这是孩子们将永远感激的礼物。¹

朝气蓬勃的化学家

奥斯卡·本杰明·克莱因（Oskar Benjamin Klein）于1894年9月15日出生于斯德哥尔摩的郊区莫比（Morby）。作为拉比最小的孩子，几乎从一开始，他就想成为一名科学家。¹¹⁷他渴望收集贝壳、蝴蝶等自然界标本，也喜欢通过母亲看戏用的小望远镜，观看群星。因为童年读的书有达尔文的作品，他最开始的抱负是成为一名生物学家。但是当长成十几岁的小家伙时，他的兴趣转到了化学，他的父母为他买了一个完整的实验室——并非一套初级设备，而是实验器材充足的整套工作室。

为了引导他的研究，他们给他用化学家威廉·奥斯特瓦尔德（Wilhelm Ostwald）写的教材。克莱因以极大的热情读完这本书，把它铭记于心。不久，他就可以用不同的材料熟练地¹¹⁸



奥斯卡·克莱因，20 世纪最重要的瑞典物理学家之一。他也是五维理论量子形式的发展者。

实验，包括制造自己的烟花。

1910 年夏的一天，克莱因的父亲受邀参加一个和平会谈。他发现奥斯特瓦尔德也将出席，于是热切地接受邀请。会议结束后，阿伦尼乌斯欢迎奥斯特瓦尔德和拉比共进午餐。拉比问



道可否把两个儿子——克莱因和他的兄弟一道带来。阿伦尼乌斯同意了，并且很欣喜能够见见如此迷恋化学的孩子。

阿伦尼乌斯被克莱因的兴趣感染，邀请他加入到自己的研究实验室。克莱因在和放射化学有关的一系列的项目中协助阿伦尼乌斯，他用一个最原始的电子显微镜研究放射性衰变产物。放学后的闲暇，他也和阿伦尼乌斯的副手伊斯特·雷森福得（Ernst Riesenfeld）合作了一篇文章——关于氢氧化锌在碱金属中的溶解性问题。尽管年仅 18 岁，克莱因已经在实验界发表文章，且成为其中合格的一员。

大约那个时候，他完成了高中学业，进入斯德哥尔摩大学。他继续研究化学，但是在看完洛伦兹和亥姆霍兹的教科书以后，他迷上了物理。很令人惊讶，阿伦尼乌斯认为理论物理可能是他最好的职业选择。怀着极大的期待，克莱因一头扎进新的领域，努力钻研。“这是一段奇妙的时光，”他回忆道，“一切都是全新的，而我的热情几乎无限。”²

1914 年，克莱因的父亲去世。他的母亲认为这个悲痛的年轻人在国外呆一段时间会比较好。于是他踏上去德国和法国的研究旅程，在此期间第一次世界大战爆发。他想留在巴黎和实验物理学家佩兰（Jean-Baptiste Perrin）一起工作，但是他发现自己的思绪已经飞到了斯德哥尔摩。从 1915 年 6 月到 1916 年 10 月，他服完必需的兵役，即使他的内心把自己看成国际主义者，但他依然怀着一颗爱国之心，为能够服役于瑞典的军队感到光荣。³

原子之谜

退伍后，克莱因回到阿伦尼乌斯的实验室，开始为他的硕士学位努力，学位考试可以检验他的学术训练成果。他开始阅读更多的理论物理方面的东西，包括玻尔的文章。他头一次看到那么真实地展现在他眼前的量子化的观点：能级以分立形式存在的原理。¹¹⁹

玻尔的原子模型解释了为什么光线被气体吸收或者从气体中产生，然后分散成固定的光谱谱线。它详细说明了电子围绕原子的核运动时所处的径向位置，并且只有当电子吸收或者释放一个确定大小的能量，才能从一个地方跳（更专业的词应该是跃迁）到另外一个地方，称为量子化（quanta）。无论何时，当电子朝着更加接近原子核的方向跃迁时，都会发射一个光量子，或者称为光子。无论何时，当电子朝着远离原子核的方向运动时，需要吸收一个光子（的能量）。如果这些情况都没有发生，电子就会在一个稳定的轨道上永远维持下去。发射或者吸收光子的频率（振荡速率）由它们的能量决定。因为每一个频率都可以用一条独一无二的谱线表示，而原子能级则以特征谱的形式表示——彩虹般的独特的谱线揭示原子的内部工作机制。

由于克莱因的实践背景，一开始，玻尔理论的基础让他觉得难以理解。玻尔实验室的使者，荷兰物理学家克拉默斯（Hendrik Kramers）代替玻尔来到斯德哥尔摩，举办一些讲座。这让克莱因印象深刻，即使克拉默斯大概和他同龄，但看



上却比他老成而且更加富有经验。

大约就在那时，克莱因找到了一位研究伙伴。尽管他最先打算申请基金与爱因斯坦或者彼得·德拜（Peter Debye）（另一位物理学家）一同工作，但是他被亨德克完全打动了，决定找玻尔申请一个职位。得到基金后，他旅行到哥本哈根，玻尔作为丹麦理论物理的首席教授，在这里的一个小小的办公室工作。

克莱因的决定预示物理世界将要发生巨大的变革。在玻尔最非凡的时期，物理界的引力中心从柏林——德意志的首都勃兰登堡门（Brandenburg Gate）以及普鲁士帝国的体制下，向北发展到了哥本哈根，汉斯·克里斯蒂安·安德森（即安徒生）、小美人鱼以及在提沃利休闲公园行军的小男孩们的故乡。在这个奇幻的北部之地，不久将会诞生奇迹般的新的理论。

在哥本哈根的时候，玻尔的主要助手亨德克非常关照克莱因，并在理论原子物理方面给他上了速成班。很快，克莱因就认识到那个时候理论物理面临的紧迫问题：解释电子奇怪行为的根本原因。

在这一点上，玻尔的原子理论遇到很大的麻烦。虽然他成功地预测了一些特征谱线，但是却无法解释为什么电子在它们的轨道上，围绕原子核转动，然后跃迁，以一个非连续（离散）值，到一个低能级。换句话说，他找到了线索，却不能给出原因。然而，玻尔还是充满希望，科学将最终能够解释这种不寻常的现象，这可能导致对物理世界全新的思考方式。

每逢散步于城北的乡村，克莱因就会想起玻尔的哲学观，心存感激。和道教信徒类似，玻尔把自然看成对立的统一，这

样的观点不久以后令他把互补性原理抓在手中。玻尔宽广的思想随时准备着接受那些极端矛盾的观点，他把它们理解为同一难题的相互纠葛的部分。比如，尽管在某些时候（通过定义能量和动量）他把原子看成一个经典力学系统，另些时候（需要分立轨道）他又会完全避开用经典情形去分析。就如他曾经评论道：“我们将永远无法理解任何事情，除非我们找到了一些矛盾之处。”⁴

从1918年到1919年，克莱因数次往来于哥本哈根和斯德哥尔摩，他同时着迷于阿伦尼乌斯和玻尔实验室的研究项目。也在这个时候，亨德克回到莱顿跟随埃伦费斯特完成他的博士研究，玻尔就让克莱因作他的首要助手。如此，克莱因和玻尔开始了很长一段时间的硕果累累的合作。

玻尔具有极好的运动体质，特别在足球场上他的特点可以发挥得淋漓尽致，他在丹麦也以此闻名。他热爱徒步旅行、航海、滑冰，并且抓住一切机会锻炼体格，同时他的大脑也为量子问题着迷，冥思苦想。克莱因虽然比较瘦长，但块头不错，他们轮番做东，带着对方去不同的地方远行，这让他们有充足的时间分享观点。这类思维的对话被称为“哥本哈根精神”，闻名于世，并因此激发出伟大的灵感，使人们对量子理论的研究突飞猛进。克莱因回忆往昔的那段日子，感慨道：“在这样的氛围中，很自然就会去设想隐藏在所有的量子成员之间的奇怪量子规则下的深刻背景。”⁵

一次，克莱因问玻尔，用何种方法描述自由粒子在时空中的运动方式。玻尔不经意地谈到，标准的四维力学可能不足以来描述，他推断在更高的维度中才有可能。克莱因一开始只看

121



到了玻尔评论的表面价值，于是着手思考如何在物理中把更高的维度包含进去。不久，他意识到，玻尔的话中包含了更多的东西。“他认为不可能有一个四维理论的观点，我觉得太过消极。”克莱因事后认识到。⁶

对于物理学家来说 20 世纪 20 年代出现了很多重大事件。1921 年，克莱因终于在斯德哥尔摩得到了博士学位。克拉默斯（即亨德克）出现在他的论文答辩会上，因而讨论变得生动有趣。同时，玻尔自己的理论物理学院成立，它独立于哥本哈根，并且立刻成为现代科学的圣地麦加^①。这个中心的成立，部分资助来源于以酿造啤酒闻名的卡斯伯格（Carlsbergs），不久以这个学院命名为尼尔斯·玻尔学院。哥本哈根会进行一系列的讲座，日后被人称为玻尔节（Bohr Festival），因为他的工作得到了众人称赞，所以本人也成为第一位受此殊荣的人。

克莱因陪同他的丹麦导师参加这个节日，在这里他第一次被介绍给沃尔夫冈·泡利和保罗·埃伦费斯特。尽管泡利和埃伦费斯特都来自维也纳，但却是他们首次见面。别人介绍道，泡利最近在相对论、宇宙学和统一场论皆有著述，而这在他 20 岁的弱冠之年就已完成，这样的赞美让泡利容光焕发。而他的这些论文内容如此全面丰富，以至于数十年内，被认为是这个领域的权威。甚至连爱因斯坦也认为泡利是位神童，称他的工作深刻、成熟、思想卓越。⁷相反，埃伦费斯特刚刚和妻子合作了一篇统计力学方面的文章，富于原创性但是充满争议。这些文章都收录在同一本百科全书中。

① 沙特阿拉伯西部，穆罕默德诞生地，伊斯兰教第一圣地。

克莱因发现，泡利和埃伦费斯特两个人都不同寻常地心直口快。克莱因说道：“那个时候，埃伦费斯特站在离泡利较远的地方嘲笑地瞧着他说‘泡利先生，相比你的人，我更加喜欢你的文章！’



泡利和埃伦费斯特在一起。20 世纪两个最主要的奥地利物理学家，他们直言不讳各自对高维的看法。

而泡利也反唇相讥‘真是有意思，我恰恰相反！’”⁸

1922 年，在爱因斯坦摘得诺贝尔奖一年以后，玻尔也获此殊荣。在他诺贝尔奖演讲的时候，克莱因看到玻尔没有带上稿子便径直走向讲台，克莱因忧虑万分；玻尔显然太激动，忘记把它们带上。玻尔与听众分享了迈向牢固的量子力学理论的路途上，人们取得的成就和遇到的挑战，玻尔非凡的即兴演讲，让克莱因无比欢欣。



那个时候，克莱因也有了自己的心事，他希望能在瑞典的大学里找到一份工作。他已经有一份兰德大学的临时邀请函，但他想让自己的工作更加稳定。与此同时，玻尔在安阿伯（Ann Arbor）城的密歇根大学发现了一个访问学者的位置，他热忱建议克莱因申请。密歇根大学接受克莱因的申请后，克莱因也同意了大学给他的职位，可仍然希望能够在未来的某个时候回到瑞士。

123 准备起航去往美国的前夕，克莱因结婚了。幸福的新娘叫做科赫（Gerda Agnete Koch），一位内科医生的女儿，学习丹麦文学。一个是拉比之子，一个与主教牧师有关，这让他们觉得很有意思。按照圣经上的说法，他们将有六个孩子，享受天伦之乐。⁹

安阿伯城的日子

1923年秋天，克莱因在密歇根大学开始了他为期两年的讲师生活，他需要提高英语水平。他当时已经能够流利地说瑞典语、丹麦语、德语和法语。尽管他在学校学过英文，但是从来没有实际用过。因此，诸如“我们必须分开来看……”（We must look apart from...）的表达，加上他奇怪的发音，把他的学生逗得开怀大笑。一位帮助他的同事，考尔比（Walter Colby）在他课堂上随时纠正他的错误，学生们觉得这“比较败兴”。¹⁰ 克莱因的英文水平与日俱进，到最后就好像母语一般。最终，他流利的表达可以与本地人媲美。

安阿伯远离当下尘壤喧嚣的欧洲，是一个静谧的小镇。克

莱因发现这正是验证他量子理论观点的好机会，他开始检验量子规则之间的联系。实验需要成倍数关系的固定能量，还需要了解光的性质。光学上，光波彼此之间有相互干涉（以叠加的方式合成到一起），产生可以预测得到的明暗相间的带状条纹。特定情况下，这些带等距，就像交叉路口的斑马线。克莱因想知道，类似的，能否用波的干涉样式理解原子中电子的规则分布。

克莱因从来没有将这些想法发表——这是他众多的“几乎由他发现的事情”中的第一个。法国物理学家德布罗意（Louis de Broglie）那个时候发表了一篇类似观点的文章，但是比克莱因的想法更进一步，这篇文章影响深远。在德布罗意获得诺贝尔奖的这个研究中，他以敏锐的眼光证明了电子（或者其他物体）如何表现出波粒二象性——某些情况下比较像粒子，别的时候又比较类似于波。利用电子动量和波长的关系、能量和频率（振荡速率）的关系，他成功地预言了如果电子之间相互干涉会形成什么样的图形。此外，他找到了一个很聪明的方法——通过把电子描绘成驻波解释玻尔电子能级位置。

124

只要振荡被局限于有限的空间，就会产生驻波。例如，鼓或者笛子引起的空气振动。音乐家依赖这个产生基本的振动和共鸣，然后把它们巧妙地合成丰富的声音。拨吉他弦是个非常好的例子，当弦被拨动，振动从一端传到另外一端。很短的时间里，原始波和反射波相互作用，叠加，在空间中上下振荡，而不是前后振荡。这些驻波可以有一个峰、两个峰甚至任意整数个峰。比方说，人们无法想象，一根振动的弦只有四分之一或者四分之三个峰，振动的自然模型要求振荡频率为基频的整



数倍。

德布罗意提出，一个围绕原子核旋转的电子，就好比振荡的驻波。就像一根拨动的弦，我们可以设想它的振动频率为基频的整数倍，这对应于电子能级为其基态能级能量的整数倍。这就解释了为什么人们在两个确定的量子态之间，从来没有发现电子存在，这个整数值得对应于玻尔的量子数。

克莱因不久后读到德布罗意的文章，非常感兴趣，但也心存一些疑虑。尽管他同意把电子当做波来对待这一基本观点，但他觉得德布罗意没有解释为什么自由电子可以像粒子那样运动的根本原因。不知何故，克莱因相信，那些波聚集到一起叠加后刚好可以产生性质类似于粒子的波前 (wave front)^①。它们在空间中运动，就好像在浪尖上冲浪。

为了正确构建起伏的波前模型，克莱因觉得三维空间加上时间还不够。因此，他回忆起玻尔的建议，决定研究粒子运动的五维模型。他希望，把五维运动投影于四维时空，物体的运动就可以呈现出量子性质，好比从棱镜折射出来的各样的图像。

125 事实证明，在普通的时空中，就有方法说明为什么电子的行为既与粒子相似又像波，即薛定谔方程。不过，当人们找到这个方程的时候，克莱因已经花费了将近两年时间来探索五维理论的性质。

^① 也称为波阵面，是指波或振动在通过介质的同一时刻里形成的连续的线或面，包括其在空间里达到的所有点。

闭合的圆环

1924年，克莱因正一丝不苟地进行他的五维研究，此时他也教授一门电磁学的课。他在课堂上考虑过一些问题，其中包括引力与电磁场的共同作用对电子的影响。毫无疑问，克莱因从泡利的这方面论文中汲取大量的知识，已经是一位引力方面的专家。

克莱因决定利用哈密顿-雅可比（Hamilton-Jacobi）方程向这个难题发动进攻。运用这种方法，人们需要定义引力和电磁场两者的势能（由场推出来的势能函数），然后利用这些势能，再加上动能的表达式，来找到物体动量（与速度有关的量）与它坐标的关系。本质上，就是应用一组方程和函数，以此告诉我们如果知道物体在哪里，那么它将以多快的速度运动。这就像是一个天气模型，一定条件下，它可以告诉我们堪萨斯州的风速。

写下引力和电磁势后，克莱因觉察到两者之间有类似之处。尽管引力势是从一个几何项——爱因斯坦度规分量中推导出来的，而电磁势来自与之不同的基础——麦克斯韦方程，但是克莱因发现，它们在方程中扮演的角色差不多。克莱因意识到，如果把电磁势看成度规分量的一部分，作为第五维，而把动量的第四个分量看成电荷的倍数，他可以把这两个表达式合而为一。就像希区柯克的电影《迷魂记》中的高潮，主角（由Jimmy Stewart扮演）要求一个假扮别人的女人回复原来的相貌，从而确定了她真实的身份。类似的，克莱因揭开电磁场项

126



的面纱，展示了它真实的身份——度规的分量。他如此叙述自己的发现：“因此，那种相似性让我觉得可以把电磁势和爱因斯坦引力势合到一个方程中去，这个想法让我怦然心动。而在合适的单位下，电荷就类似于动量的第四个分量，整体看来，就像是四维空间的波前方程。这让我的思考陷入迷雾，若干年我都没能从中解脱出来。”¹¹

克莱因接着假设，基本粒子的行为就像驻波，这和德布罗意的办法类似。他证明，这种情形下，粒子的动量与它的波长成反比（动量越大，波长越短），与两者相关的比例系数非常小，人们称之为普朗克常量。因为克莱因认为第五个维动量和电荷是一回事，因此，电荷与第五维的波长联系起来。

和德布罗意一样，克莱因设想这些驻波排列成一个圆环，在圆周上，只能容纳整数个波峰。因为波长是这圆周的固定的一小部分，而电荷和波长有关系，暗示只能以一个特别的单位的整数出现。以现代物理语言来说，电荷是量子化的。

克莱因的时代，物理学家已经通过油滴试验知道电荷的最小单位是电子电荷，任何电荷都是这个基本量的整数倍。因此，克莱因的优美结论重现了以前无法解释的试验现象。

电荷和波长的关系令克莱因想到，电荷的最小单位决定了第五个维度中圆的半径。克莱因判断这个半径小于 10^{-30} 英寸——比微不足道的原子核还要小得多，一兆兆个这样的半径才仅仅是细菌那么大。

克莱因发现第五维的这个细微的尺寸最让人鼓舞，他很高兴他的理论预言——第五个维度永远都不可能观测，这就精

彩的解释为什么时空只能呈现出四维。

想象一个第五维紧紧卷曲的宇宙就好比读一本薄薄的卷轴。¹²⁷假设从书里撕下一页纸，纸与纸紧贴着卷起来，直到仅能区分部分句子。然后，假想把它越卷越紧，直到单词都掺合到一起，接着是字母。最后，这张纸扭曲成意大利面条的样子；上面打印的东西成了灰色的斑驳，完全无法分辨。就像克莱因的理论，信息仍然是存在的，但是存在于卷曲的方向，朦胧模糊，因而无法知觉。

悲痛的成功

1925年夏季，克莱因和他的妻子与楔形板覆盖着的安阿伯的房子道别，驶向哥本哈根的镀铜塔尖^①。他在那里完成了计算，与玻尔就此详细地讨论了一番，玻尔指出他的理论和德布罗意的论文的关系，于是克莱因好奇地看了一遍。

夏日即将结束，玻尔邀请克莱因以研究员的身份到他学院工作。克莱因欢快地接受了玻尔的邀请，他请求首先回斯德哥尔摩看望母亲，他已经有两年多没有见到她了。克莱因原本只打算在家乡稍做逗留，因为他急切地盼望回到丹麦，向同事们介绍已经完成的五维模型。¹²⁸

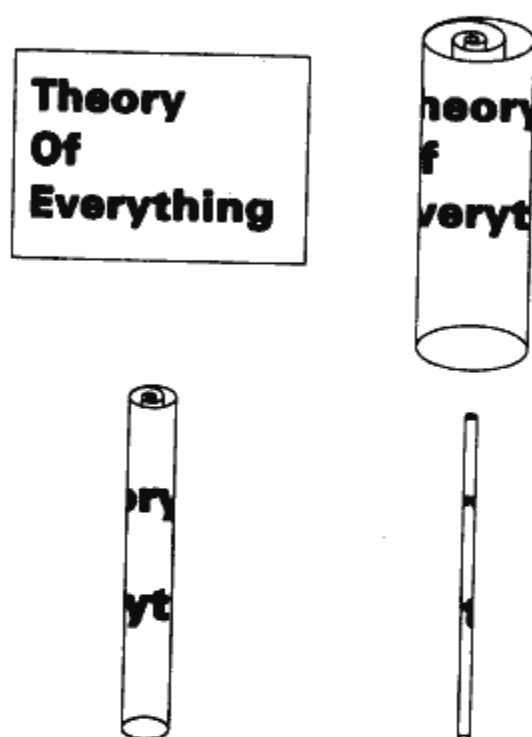
很不幸，糟糕的身体状况让他在瑞典呆的时间远比想象的长。接踵而至的疾病令他非常苦恼。首先，他被流感袭倒；紧接着感染肝炎，加重了病情；黄疸和发热让他卧病在床数月。

① 哥本哈根著名的景点。



直到 1926 年 3 月，恢复得差不多了，他才回到哥本哈根。

一回到玻尔研究所，克莱因沮丧地发现在科学发展的关键时期，自己却袖手旁观。他病倒的这段时间，海森伯的矩阵力



把一页纸越卷越紧，上面的单词就会变得无法阅读。类似的，把万有理论的额外维度卷曲，直接的效益变得无法检测。

学和薛定谔的波动方程相继出现，每一种方法都描述了亚原子粒子的量子行为，并预言了原子中的电子结构。克莱因已经发展出薛定谔方程的形式，但是因为身体虚弱，所以没能将其发表，这是他一生中最失意的事情。

更糟糕的是，回到哥本哈根数周后，克莱因发现他的理论和卡鲁扎理论的相似性。泡利那时在玻尔研究所访问，浏览了他的工作，告诉了他这个坏消息。克莱因原来只是模糊地知道

卡鲁扎和外尔各自提出了统一场理论，但不了解详情。他并不知道卡鲁扎想法和他一样，就是再加上一个维度扩展爱因斯坦的广义相对论，以此和电磁场调和到一起。当泡利指出它们共同点后，克莱因终于查阅了卡鲁扎的文章。事实上，尽管他的理论基于不同的方法和假设，但是在概念上，彼此不可思议地相似。克莱因想明白，他是否浪费时间，在别人已经耕作过的土地上下锄犁地。

为了避免绝望，克莱因回忆起在克雷默困苦不堪的日子里，他曾经对克雷默的一些忠告。他说过，应该把科学看成小孩子们玩的游戏，如果一些事情证明是错的，那么就去玩另一个游戏吧。

克莱因振奋精神，决心至少要把自己五维方面的工作公布出去。那种苦闷，就像他说的：“尽自己一切力量，从悲痛的失败中留下一些东西。”¹² 他决定写两篇文章，强调自己的创新。尽管他觉得他的理论与卡鲁扎的明显不同，但他还是承认了卡鲁扎是这种方法的原创者。他不久便后悔做了这个决定，因为这意味着他的工作仅仅是衍生和推广，就如克莱因在一次采访中坦陈的：“卡鲁扎……仅仅在一阶近似的情形下导出了场方程。而在那个夏天以前，我就已经把它做出来了。所以，我并没有很惊讶卡鲁扎的文章，但是尽管如此我还是要在自己的文章中引用他的工作，毕竟他比我发表的时间早得多。没有人了解我是独立地完成自己的工作的。”¹³

对这一思想做出了贡献，却没有得到应有的肯定，克莱因耿耿于怀，因为德布罗意曾经在一篇文章中把卡鲁扎和亨德克看作五维理论的合作者。尽管亨德克对此几乎没有任何作为，



克莱因友好地在他的第一篇文章中引用了卡鲁扎和亨德克的文章，德布罗意误解了克莱因的意思，以为克莱因认为卡鲁扎和亨德克在五维方面应当获得所有的荣誉。克莱因只得退步，认为两年原创性的工作将被人们遗忘。

很幸运，事实并非如此。克莱因的文章在原子理论的联系方面脉络清晰，因此，相对卡鲁扎（当然，更不用提诺德斯特朗晦涩的理论），他的工作让物理学界更为关注。直到那时，只有爱因斯坦和他的朋友对卡鲁扎的五维思想有兴趣，而克莱因用高维解释量子效应，超越了那个时代，比别的解释更加合理。何况，他对于第五维的微小尺度的计算与实验限度符合得很好，让他的理论似乎更加令人信服。

大约在克莱因的第一篇文章出来的时候，两个圣彼得堡的物理学家，福克（Vladimire Fock）和曼德尔（Heinrich Mandel），也各自独立地发展出与之类似的观点。当他们的文章已付印的时候，他们发现了克莱因的工作，于是毫不犹豫地对他的成就给予肯定，他们以后成为俄罗斯的五维理论的提倡者。福克的贡献影响深远，以至爱因斯坦经常称这个方法为“卡鲁扎-克莱因-福克”方法。

“五维公寓”的生活

保罗·埃伦费斯特是克莱因思想最热心的支持者之一，对于为何时空呈现出四维的样子，他尤其感兴趣，埃伦费斯特发现克莱因的解释非常有吸引力。此外，埃伦费斯特非常敬重玻尔，他认为聪颖的克莱因乃是玻尔的提携之人。

为了更加清楚克莱因的思想，埃伦费斯特要洛伦兹邀请他到莱顿做暑期访问。当克莱因收到洛伦兹的信时，激动万分。十几岁的时候开始，他便对洛伦兹清晰明了、入木三分的文章印象深刻，克莱因期盼着与他心目中的英雄们会面。

1926年6月，克莱因来到莱顿，和埃伦费斯特年轻的学生乔治·乌仑贝克（George Uhlenbeck）住在一所公寓里。乌仑贝克生于爪哇的一个德国-荷兰家庭，是量子物理和统计物理的后起之秀。克莱因来这里的一年前，乌仑贝克和同学古兹米特（Samuel Goudsmit）发现了电子自旋。对于原子理论来说，这是一个极端重要的发现，让玻尔、海森伯等人都非常兴奋。

乌仑贝克和古兹米特这一发现的动机来自于泡利的一个建议，他认为电子的行为应该完全可以用四个基本的量子数描述，从而可以区分它们所有可能的能级。第一个数是玻尔能级，第二个数和几何性质有关，第三个和电子在磁场中的行为——塞曼（Zeeman）效应有关，但是没人知道第四个是什么。乌仑贝克和古兹米特聪明地猜测，第四个量子数与电子另外的运动方式有关联，即电子可能顺时针或者逆时针旋转，他们把这个新颖的概念称为自旋（spin）。泡利适时地发现两个电子可以以相反的自旋成组存在，更多的电子就不能。这个概念就是著名的泡利不相容原理。

克莱因的理论没有考虑自旋，事实上是一个不好的预兆。毫无疑问，乌仑贝克非常崇敬他的新同事兼室友克莱因，相信他已经指出了解决有史以来最伟大的谜团之一的道路。他为克莱因伟大的洞察力“狂喜不已”¹⁴。乌仑贝克这样回忆当他第



一次听到克莱因的模型时的情景：

131

我仍然记得有一次和克莱因讨论，他叙述了他的五维相对论以及量子条件是怎样得到的。你看，从周期性中你可以得到量子条件。事后，我如此激动，我（对我的朋友）说，“我们马上就可以把这个世界确定下来，我们将知道所有东西！那时万事万物都将被知晓。”当然，这是美好的夸张。¹⁵

乌仑贝克和克莱因很快成了朋友，在克莱因一个月访问期间，他们几乎每天都在不停地讨论五维理论。埃伦费斯特很自然地卷入其中，他很高兴可以借此机会继续他的维度研究。他特别好奇，为何一些方法只能在特定的维度中才有效。

不像乌仑贝克，埃伦费斯特不相信克莱因的理论会是打开所有物理难题的万能钥匙，对于所有新的方法他皆保持怀疑态度。他天性便是率直地质疑一切。不过，他仍然满怀希望地给爱因斯坦写了一封短笺：“我相信他的思想，在此刻虽然它并未被证实而值得怀疑，但是可能产生一些超越薛定谔的更好的结果。”¹⁶

埃伦费斯特、克莱因和乌仑贝克花了很多时间讨论这些难题，他们决定在这个方向合写一篇论文，试图解释塞曼效应等量子行为。但是事实证明，这篇文章大部分都是克莱因的思想，于是埃伦费斯特没有发表它，他认为在一篇主要是别人写的文章中署上自己的名字不公正。克莱因离开哥本哈根不久，埃伦费斯特和乌仑贝克一起写了一篇文章，描述德布罗意波在

五维空间中的行为。尽管参考了克莱因的理论，但是这篇文章中，埃伦费斯特和乌仑贝克用他们自己的表述，来分析五维的波行为。

伟大的分歧

与莱顿悲伤地道别后，克莱因来到一个已经毫无争议地成为现代物理中心的圣地继续他的研究。玻尔研究所已经成了量子物理的“梵蒂冈”，评价关于自然的创新理论，消除不同派别之间的分歧，建立规范的学说，发行最具权威的文章和著作。对于一代原子理论的朝圣者，条条大道通往哥本哈根。

132

那个时期，解决量子之谜是靠海森伯提出的方法还是薛定谔的方法，人们发生了激烈的争论。海森伯的方法太过玄妙，当时他只有23岁，明眸善睐，他抛弃了一成不变的电子轨道的观念，用无法观测的数学上的抽象概念取而代之。他称自己的理论为矩阵力学，并证明了量子态之间如何进行特殊变换，以此解释原子结构。

另一方面，薛定谔的方法，植根于传统的物理理论。他的方程描述了为何德布罗意物质波要么在空间中自由运动，要么被束缚于原子势阱中振荡。就像海森伯的模型一样，薛定谔方程被证明是威力无穷的工具，他能精确地预言被观测粒子的行为和光谱。

1926年6月，那时克莱因还在莱顿，物理学家马克斯·玻恩以更加基本的新的方法重新阐释了薛定谔方程。他提出，薛定谔方程描述的不是物质波，而是几率波。他陈述道，电子



和别的粒子的所有性质，都只能通过几率方式得到，永远都不可能得到精确结果。

薛定谔非常愤怒有人如此改造他的工作。他觉得，波动力学应该是精确的决定性的，而不是模棱两可的概率性的。“如果你一定要搞这些该死的量子跃迁，我宁愿自己永远也不去做（什么）原子理论的工作，”¹⁷他绝望地告诉玻尔。对于什么理论将会指导人们，爱因斯坦赞同薛定谔的立场，在一封给玻尔的信中，他有句著名的话：“我相信上帝是不会掷骰子的。”¹⁸但是，海森伯觉得薛定谔的方程并非任何情形都适用且都能够转换到矩阵力学。毫无疑问，所有这些理论家们，谁都无法阻止人们在原子行为的非决定论中参观薛定谔的工作；这个模型太成功了。

1927年的冬天，玻尔跑到山顶寻找灵感。对他来说，滑雪是一种宗教式的体验，这个过程中，他可以在清新寒冷的空气中集中思想，他冥思苦想如何将薛定谔、海森伯等人的观点整合成一个统一的理论，可以让所有人接受。山风从他身边呼呼而过，山谷愈加逼近他，他终于发现他苦苦寻找的“禅宗的答案”（the Zen answer）：互补原理。玻尔意识到，波和粒子的图景都是正确的，只不过当试验观注其中一种，另一种就会隐匿。

他马不停蹄地回到哥本哈根，海森伯作为一名研究员，正在那里工作。玻尔兴奋地告诉海森伯他的发现，而海森伯也向玻尔详述了自己的思想。玻尔离开后，海森伯对那个问题形成了自己的看法，叫作不确定原理（uncertainty principle）。它描述了物理性质是如何依赖于观测的。他提出，粒子诸多可测

量的量——诸如位置和动量，具有对应关系，科学家知道其中的一个越多，那他们对于另一特性就知道得越少。因此，完全明白一个粒子的属性是不可能的。

克莱因兴致勃勃地注意这场争论。尽管对于用他的五维理论解释量子动力学，他仍然抱有希望，不过他也逐渐明白其他方法的价值。试验的成功是难以辩驳的，海森伯的矩阵力学和薛定谔方程都可以轻而易举地解释原子光谱线。而且，作为玻尔殷切的信徒，他也被这个丹麦物理学家对自然无与伦比的洞察力折服。

关于互补性和不确定性哪个更加优秀，玻尔和海森伯喋喋不休地争论，克莱因见证了这一切，他决定做一个打破僵局的人。经过“外交”努力，克莱因让他们都相信双方的观点都是正确的。经过很多次穿过公园长时间的散步思索，玻尔和海森伯达成一致，他们同意互补原理和不确定原理是等价的，是理解自然同一方面的不同的方法，每一种方法都强调观测者如何观察和观测到什么这两者之间不可分割的关系。

很快，通过玻尔的劝说，海森伯开始接受薛定谔方程和他自己的完全等价。一阵子的连哄带劝，玻尔同样让薛定谔至少暂时接纳了对方。在盛大的理论调和过程中，所有的可能要将量子力学的教堂分崩离析的分歧，最终达成互通。

诙谐的物理

在量子力学降临的这段时间内，尼尔斯·玻尔研究所也

134



抓住机会，做一些有趣的事。他喜欢编搞笑的段子寄给他的同事们，不时还配上卡通画说明一下。

在一封挖苦埃伦费斯特的信中，克莱因把他叫做“陛下、贤者、莱顿最强大的皇帝”，克莱因很谦逊地称自己为埃伦费斯特的“仆人和玻尔城的领事”，接着他继续描述“如果他过于威严，那么处于严厉的皇帝管制下的春日的嫩芽和繁花，该会如何颤抖喘息。”在信上，克莱因手画了“莱顿”和“玻尔镇”的“封条”。¹⁹

埃伦费斯特回复了克莱因，他用拉丁文写下地址“丹麦哥本哈根的领事奥斯卡·克莱因”（Consul Oscari Parvo in Danish Hafnia），署名保罗·埃伦费斯特（Paulus Honestus）。²⁰



哥本哈根的玻尔研究所，量子理论在此诞生，克莱因在此工作了许多年。

135

这是一个非常晦涩的玩笑，拉丁文中“Parvo”的意思是“小的”，相当于德文中的“克莱因”。类似，“Honestus”在

拉丁文里可以翻译成“Ehrenhaft”或者“尊敬的”。最后，“Hafnia”是哥本哈根的拉丁称谓。

也不是所有幽默都这么难以理解。有不少就是对那个时代的讽刺，甚至把大量的政治也掺和进物理。当时法西斯独裁者墨索里尼（Benito Mussolini）公然挑衅国际联盟，决定吞并埃塞俄比亚（Ethiopia）。他傲慢地宣布：“即使没有日内瓦的支持甚至于不惜与之对抗，意大利也要追求它的目标！”克莱因写了一段话，他建议世界的领导者应该学习一下量子力学。他劝他们好好利用一下互补原理与对立面和谐统一地共存，因为由此“玻尔（包括泡利）才能够创造原子世界近乎完美的和谐。”²¹

克莱因提交了他非常幽默的文章，标题为“关于政治量子化”，并把它献给玻尔以此祝贺他50岁的生日。这个《幽默物理杂志》以后也只出过两期——为了纪念玻尔60岁和70岁的生日。因为文章中的政治味道有可能得罪读者，所以克莱因的文章也从来没有被发表。不过，它一直都保存在玻尔的档案中。

研究所最有名的一次幽默是对《浮士德》中人物的模仿秀，所里的成员在1932年编排并演出了这场模仿秀。在戏中，泡利模仿魔鬼一样的墨菲斯托菲里斯^①，而埃伦费斯特出演愤世嫉俗的浮士德，爱丁顿是大天使，玻尔做了“上帝”，美国物理学家理查德·托尔曼（Richard Tolman）和罗伯特·奥本海默（Robert Oppenheimer）在“安阿伯夫人昏暗的酒吧”喝

① 浮士德传说中的魔鬼，浮士德将自己的灵魂出卖给了这个魔鬼。



得酩酊大醉，爱因斯坦则是位全身爬满跳蚤（暗指各种统一场理论）的国王，里头甚至还有个可怕的“量子沃尔珀吉斯之夜”，借以嘲讽保罗·狄拉克的理论。戏剧剧本由俄罗斯物理学家伽莫夫配以夸张滑稽的漫画，作为礼物送给了玻尔和研究院。

为论理的完结干杯

20 世纪 20 年代后期，克莱因慢慢加入到别的项目中去，他的五维理论因而退出历史舞台。物理学家帕斯库尔·约当作为新人来到研究院，用量子理论来描述场是他追求的目标。克莱因觉得“他必须做出选择，要么把五维方法作为量子理论的基础，那将是第五维中，有某种因果关系的理论；如果上述方法不可能的话，那就一定存在类似于力学中的量子化那样的处理场的方法。”²²

约当生于 1902 年 10 月 18 日，他的名字与德裔西班牙人的祖先一样。来哥本哈根之前，他在格廷根跟随诸如希尔伯特、玻恩等教授学习数学和物理。他曾经和很多人共事，包括玻恩和海森伯，他们于 1925 年发表了著名的“三人论文”（dreimännerarbeit），建立了一些基本原理，他在量子力学发展中扮演了重要角色。约当是一个羞涩的、没有自信的、紧张时还会结结巴巴的人，他觉得物理界不会对他的贡献给予恰当的肯定。

约当与克莱因的兴趣相似，希望从五维概念等方法出发，改进量子波动理论，使之更加精确。他是研究所中赞赏克莱因

的目标的为数不多的几个人之一，他对克莱因的模型充满热情，这影响了他的后半生——打造自己的统一理论。但是，约旦和克莱因都没有看到任何希望可以推进五维方法。因此，取而代之，他们开始坚持不懈地一起寻找方法把场量子化——就如同量子化粒子那样，他们的研究产生了一项重要程序：二次量子化。

整个 20 年代，克莱因五维理论盼望着最后的“救命稻草”来自狄拉克给玻尔的一个包裹（10 年后他又重新回到这个问题上），里面是狄拉克详述电子的相对论量子理论的第一份手稿。玻尔被他天才的工作震惊，因为他不仅将这个世纪早期两个主要理论——相对论和量子力学结合到一起，同时还考虑了自旋。为了处理自旋，他发展了莱恩、沃尔特·戈登等人提出的一套程序，做出了它的普遍形式，这就是今后为人所知的克莱因-约旦方程。（克莱因-约旦方程本质上，是克莱因五维理论的四维形式。）

1928 年初，玻尔希望克莱因能够深入了解狄拉克的工作，于是把他送到剑桥大学，狄拉克是那里圣约翰学院的教员。克莱因和狄拉克讨论了他简洁的新方程，离开的时候克莱因已经完全相信，狄拉克方程才是一条统一之路，而不是他的第五维理论。克莱因回到哥本哈根，向他的导师报告了这个激动人心的消息。¹³⁷

接着，这年的复活节，泡利到了研究所。他和海森伯一道，都在试图做出包括自旋的、量子、相对论的电子的运动描述方法，但是最终被狄拉克当头一棒。海森伯和狄拉克还打赌看谁最先成功，但是无需卷尺就知道，狄拉克获得了令人震惊的胜利。



一次晚餐，克莱因和泡利决定拿出一瓶葡萄酒。这是物理的一个新时代，他们要重新思考各自的研究方向，他们举起酒杯祝词：“为第五维的终结干杯！”²³

那一年内，克莱因说到做到，回避了任何五维方面的研究。他和一位日本物理学家仁科芳雄（Yoshio Nishina）合作，应用狄拉克方程解释一个叫做康普顿效应（Compton effect）的现象。玻尔和所内别的成员都非常高兴，他们的伙伴终于扔掉了他的想法，现在成为量子力学标准解释的完全信仰者。特别是完全反对第五维理论的海森伯，他格外兴奋，因为克莱因“不再是名异教徒”。²⁴

不过，至少有一个俄罗斯物理学家对克莱因新的方向感到苦恼。1928年12月，曼德尔给他寄去一封含泪的信“最近伽莫夫先生告诉我，你已经完全放弃了五维场物理的观点，觉得它根本上就是错误的理解。其实，到现在为止，你发表的所有关于五维理论的文章都和我的观点极为一致，因此我非常抱歉，我不再和你站在同一战线。”²⁵

1931年1月，克莱因被任命为斯德哥尔摩的教授。在这个位置上他一直做到了1962年才退休。他非常开心有机会回到故土，在这个城市，他和妻子可以安宁地抚养六个孩子——事实证明的确如此，30年代到40年代令人恐惧的瘟疫席卷整个欧洲，唯独没有传染到这里。

¹³⁸ 当克莱因即将离开哥本哈根的时候，泡利虽然比他年轻，仍然给出坦率的“父亲般的”建议：“我希望你能履行你的诺言，‘为人们传道解惑’。你在教育上拥有非凡的能力……我并不觉得发现新的自然定律，指明物理新的方向是你最大的优

点，尽管你在这方面雄心勃勃。”²⁵

就在这个冬天，克莱因朝北边出发，而爱因斯坦开始了他的西部之行，加利福尼亚理工学院的几位杰出的教授，包括密立根（Robert Milikan）和托尔曼邀请他到帕萨迪纳（Pasadena）做两个月的访问研究。这让他有机会拜访美国威尔逊山天文台（Mount Wilson Observatory），埃德温·哈勃（Edwin Hubble）20年代在那里发现了宇宙膨胀，这是广义相对论最伟大的成功的预言之一。

爱因斯坦并不在意离开欧洲一段时间，他大部分欧洲的物理学朋友已经“为量子疯狂”，就如他所见，他们完全相信不确定性的魔法。作为一名受斯宾诺莎（Spinoza）^①影响的虔诚的决定论者，爱因斯坦拒绝承认物理理论中存在任何的偶然性。诸如克莱因，以前因果论（决定论）的拥护者，也被量子理论争取过去；此后，爱因斯坦和他的同行渐行渐远。

爱因斯坦依旧成果丰硕，虽然开始被物理界很多人忽视，不过大众对他的崇拜似乎没有止境。他成了一个活生生的传奇——第一位国际超级科学巨星。因此，他的作品更多地被流行期刊介绍，而不是被同僚认真引用。实质上，他发展的任何理论或是他的任何讲话，都会引起新闻记者极大兴趣。他完全预料得到，这次旅行他们一定会不断骚扰他。

尽管这是一趟工作旅行，但是他和爱尔莎期望着享受南加州宜人的气候，并且希望有时间浏览胜景。这是一片他们只能在电影中才见到的土地，但是不久后他们就将融入其中。

① 荷兰唯物主义哲学家。

第7章 | 爱因斯坦的两难

量子理论完全薛定谔化，并且从这里开始，在实践上取得了很大成功。但尽管如此，它不可能是描述现实世界的方法。它是一个神秘的东西……看来，只有通过卡鲁扎、克莱因和福克的五维理论，引力和麦克斯韦理论才能令人满意地统一。

——阿尔伯特·爱因斯坦，

致亨德利克·洛伦兹的信，1927年

流浪汉和教授

139 虽然正值美国经济大萧条时期，但查尔斯·卓别林（Charlie Chaplin）位于比佛利山（Beverly Hill）的大宅却经常贵宾盈门，觥筹交错。卓别林以一个《流浪汉》（*The Little Tramp*）中的银幕形象而名声大噪，在这部电影中，他戴着圆顶窄边礼帽，着一套褴褛不堪的衣服，手持轻便手杖四处漂

泊。现实生活中的卓别林却非常富有，可以尽宾主之宜，慷慨大方地举办宴会。他杰出的电影成就——演员、剧作家、导演，甚至为众多歇斯底里和扭曲心灵的影片谱曲——给他带来了大量财富。尽管1929年美国崩溃的股市一片狼藉，卓别林却聪明地把他的财产存入了一个安全可靠的账户中，成功地保住了财富。即便一年后的现在，他还在不停地花费这些钱财，开心地招待五湖四海的朋友。出版业的巨人赫斯特（William Randolph Hearst）、银屏偶像道费尔班克斯（Douglas Fairbanks）、受人欢迎的女演员璧克馥（Mary Pickford）等无数名人都经常来访，在卓别林的家中享受诸如“一个日本影院，真正的日本女孩，表演名副其实的日本舞蹈”¹的美妙。

但是，卓别林一点也不浅薄。款待客人时，他总能从知识的¹⁴⁰辩论中获得最大的乐趣。他的客人越有学识，他越发自豪。因此，当他有机会招待阿尔伯特·爱因斯坦这个“智慧”的代名词时——好比卡蓬（Capone）^①代表“罪恶”，卓别林欢欣雀跃。

爱因斯坦一行乘船来到圣地亚哥（San Diego）港，时间是1930年12月30日。他们受到英雄般的礼遇；迎接他们的是鲜花，美丽的“美人鱼”（女子游泳健将），还有一群群欢呼的观众。他们柏林家中的朋友在新闻短片上看到如此盛况，心想美国已经为爱因斯坦完全疯狂了。

爱因斯坦一行下榻于一座温暖舒适、装饰精致的小别墅里，位于帕萨迪纳，与加州理工学院的校园毗邻。在那里，这

^① 卡蓬，阿芳斯：（1899～1947）意大利裔美籍匪徒，曾严厉地统治过芝加哥黑社会，因逃税而被监禁（1931～1939年）。



个物理学家可以和他的同事一同讨论问题。“在帕萨迪纳就像在天堂，”爱因斯坦致信朋友们，“满是阳光和清新的空气，还有公园里美丽的棕榈树和肖乳香。每个人都洋溢着灿烂的笑容，索要签名。”²

访问的头一个星期，德国移民也是环球电影公司的创立者和负责人卡尔·雷末耳（Carl Laemmle），邀请教授到好莱坞访问。爱因斯坦希望同胞朋友给予自己特殊关照：世界上最著名的科学家想会见最著名的电影明星，雷末耳迅速安排卓别林参加爱因斯坦在环球电影公司的午餐。卓别林发现阿尔伯特“快活友善”，而爱尔莎则是一个“四方脸充满活力的女人”。³会面结束得很快，因为爱因斯坦接着要在环球电影公司游历一番。于是，爱尔莎把卓别林叫到一旁，直截了当地希望他能够设宴邀请他们。卓别林没有因她的唐突惊愕，反而非常愉悦有机会能更好地认识爱因斯坦，他立即开始为此事筹备。卓别林期望这个有名望的思想家能够在他家中放松地享受一餐，也期望可以分享彼此非凡的传说。

互相客套地赞美对方卓越的天才和艰难的成名之路之前，卓别林和爱因斯坦需要解决沟通的难题。虽然卓别林可以惟妙惟肖地模仿德口音，并且用家族特有的幽默才能，讲一些熟悉的德语单词和习语，但是他说不了德语。当开始严肃讨论时，他用标准英语平和地说话——一种公众很少感受过的情绪和声音。¹⁴¹

而爱因斯坦，仅仅第二次来美国旅行，那个时候他几乎说不了英语，他的演讲只用德语。很幸运，他可以靠爱尔莎，爱尔莎的英语说得非常好，如果情况需要可以为爱因斯坦翻译。

语言障碍因此消除了很多，但是还有一点他们需要注意，

卓别林几乎不懂物理语言——而他的客人在这方面却非凡。为了避免这方面的任何交流障碍，卓别林也带上了自己的“翻译”，塞西尔·雷诺兹（Cecil Reynolds）先生，一个自认为在这方面知识渊博的人。但是雷诺兹先生并不是物理学家，而只是卓别林的私人医生，一个脑外科医生，演员是他的第二份职业——和好莱坞的类型接近。他曾经对卓别林说脑外科手术“只不过让人们知道神经纤维所在，但是演戏却是阐述心灵的精神体验”。⁴

1931年末，雷诺兹作为一名医学顾问，成了电影《科学怪人》（*Frankenstein*）的技术指导，帮助电影强化叙述的真实性。1936年，他在卓别林的《摩登时代》（*Modern Times*）中有一点点戏份——扮演监狱长。因为他多样才华，卓别林觉得雷诺兹“略知物理知识”。这便是为何卓别林的其他朋友没能像雷诺兹一样，获得和相对论的创立者共进晚餐的机会的原因所在。

整个晚上，雷诺兹都在抓住机会卖弄他的知识。他提起刚刚读过的一本书，邓恩（J. W. Dunne）的《时间实验》（*An Experiment with Time*）。邓恩在1927年的这篇文集中用相对论中的概念论证过去、现在、未来之间交流的可能性——包括梦的预兆和通灵体验。爱因斯坦读过吗？没有。爱因斯坦从来没有看过面向普通大众的思考其理论的书，当然更没有读过把科学和灵魂联系在一起的书。

雷诺兹继续概括这本书的部分内容，他问爱因斯坦对于邓恩的思想有什么想法。“他对于维度的理论比较有趣，可以说是……”雷诺兹描述道，突然灵光一现，“一种对维度的扩展。”⁵

爱因斯坦一头雾水，他总是被持不同观点的人们，接二连

142



三地问些各种各样的事情。爱因斯坦保持幽默感：“对维度的扩展……那是什么东西？”他恶作剧地对卓别林耳语道。⁶

雷诺兹马上转换话题，他问爱因斯坦是否相信灵魂。不相信，爱因斯坦回答，他说自己从来没有看到过；如果至少有一打可靠的目击者同时看到，那么他可能就会相信。直到那时，他对灵魂的存在仍然持怀疑态度。那悬空等超自然现象呢？一个经过训练的大脑，仅仅依靠思想的力量，就可以把桌子抬到空中？爱因斯坦摇头。没有坚实的科学证据，他是不会相信这种事情的。

雷诺兹迅速地从高维进入到超自然话题，是因为公众长期把这两个话题联系在一起，这要追溯到珠勒、斯莱德和通灵协会。因此，不难理解只要爱因斯坦说到更高维的理论，他就觉得有必要澄清两者之间的区别。

话题最终又回到物理，卓别林问爱因斯坦，他的相对论和牛顿的工作是否矛盾。爱因斯坦回答，不仅不矛盾，他的理论还扩展了牛顿的观念。爱因斯坦在很多场合强调过，他强烈地相信客观的机械的宇宙，为了纪念牛顿逝世 200 周年，他写道：“愿牛顿方法的精神给予我们力量，使物理现实和牛顿教授的最深刻的特征——严格的因果关系，恢复和谐一致。”⁷

他觉得，如果不能被独立的观测者一遍遍地验证，任何事物都不能称之为事实，比如超自然力量就经不起检验。量子力学的哥本哈根阐述（也就是玻尔、海森伯和其他同事的观点）断言，原子的测量取决于观测者如何进行他们的试验，这不满足爱因斯坦的标准。他觉得，对原子运动模型来说，一定存在更深刻的方法，可以让诸多实验得到等价的结果。在客观实验原理上，爱因

斯坦坚信不疑，因此爱因斯坦原则上拒绝承认不确定原理，这一点上他决不退让，即使他逐渐被主流物理界孤立。

作为一位传统叛逆者，卓别林非常尊重爱因斯坦的独立精神，¹⁴³因为在一个有声的时代，卓别林也是唯一一位有耐心和勇气继续拍摄无声电影的导演。



爱因斯坦和卓别林在一起。1931年1月，在《城市之光》(City Light)的发布会上，爱因斯坦是卓别林的座上宾。卓别林希望理解爱因斯坦具有奠基意义的理论，而爱因斯坦对卓别林尖锐地描绘人们生存环境颇感兴趣。两个人都喜欢无拘无束，无论创造作品还是创新理论，都不愿随波逐流。



144 卓别林花费大量精力招集演员，那些愿意表演哑剧的演员；卓别林训练他们，让他们可以在视觉喜剧中将姿态准确表达出来。为了一分钟完美的电影胶片，经常要花费数天时间。别的制片者无法理解他为何要迎难而上。不过，这就像爱因斯坦一样，他只想维系神圣的传统，而不在乎同行的说法。

拜访卓别林让爱因斯坦非常开心。他说卓别林是“一位有魅力的人，就像在他电影中的角色。”⁸ 无论在加州还是柏林，他们在很多场合数次会面。尽管在超自然上，雷诺兹显得很唐突，但是这场晚宴却非常成功，奠定了他们伟大友谊的坚实基础。

巨人的战斗

爱因斯坦疏远量子理论是颇具讽刺意味的，因为早期爱因斯坦还是量子理论重要的倡导者之一。他的诺贝尔奖是为了纪念他发现了光电效应，而光电效应证明了光是一部分一部分的，也即量子形式出现的，这是导致波粒二象性概念的重大进展之一。不久，他成了量子统计的合作者以及波动力学理论的倡议者。此外，他极为敬重许多理论的发现者，包括玻尔。

玻尔和爱因斯坦 1920 年首次会面。当时玻尔在柏林进行原子理论方面的演讲，埃伦费斯特是他们共同的密友，埃伦费斯特以他典型的媒人作风，引荐对方。当玻尔回到丹麦，爱因斯坦致信道：“在我的一生中，几乎没有哪个人的存在能像你一样，让我这么开心。我现在明白为什么埃伦费斯特如此钟爱于你。”⁹ 玻尔的回信恭维道：“到目前为止，我最大的荣幸便

是能与您会面交谈。”¹⁰

德布罗意的工作出现后，爱因斯坦表示强烈支持，他将其看成原子物理新方法的种子。类似的，他也对薛定谔的方程印象深刻，因为它很典型地描述物质波的因果关系。1926年5月，他写信给朋友贝索，“薛定谔在量子定则方面做了伟大的工作。它已经触到了真理深处。”¹¹ 事后证明，这是爱因斯坦对量子理论最后的全心的赞扬。

145

一个月以后，马克斯·玻恩将薛定谔物质波重新阐释为几率波，爱因斯坦无法容忍了。他坚定地相信，宇宙中的任何事件，总是环环相套，因果相接。任何看上去随机的事一定存在我们还未知的因果次序，要么是数据不完全，要么是物理理论方法不完善。只要知道有史以来，宇宙中所有点的坐标，包括所有的信息和自然定律的完美知识，人们就可以预言未来的一切事件。

爱因斯坦把创造的历史看成事件发生的统一的网络，就像阿里阿德涅（Ariadne）的线团^①一样，从时间的开端到终结，一直延伸下去。因此，从时空的视角来看，过去和未来与当下一样真实。“对于我们有信仰的物理学家，”他不久写道，“过去、现在和未来没有任何区别，它们只是顽固的幻象。”¹² 那么，哪里可以容得下随机存在呢？就像那个时候他和玻尔说过并向许多人强调的那样，这个善良的上帝不会掷骰子决定未来——未来已经写好了。

① 希腊神话中的人物，米诺斯和帕西法尔的女儿，曾给特修斯一个线团，帮助他走出米诺陶洛斯的迷宫。



1927年1月，爱因斯坦写信给埃伦费斯特，信中是关于他对薛定谔方程的重新思考：“薛定谔的工作依然不能使我激动——它不符合因果律，并且概括地说，它太简单了。”¹³到那时，爱因斯坦已经坚定立场，不再妥协。他的朋友已经明白他的立场，并且知道不久他就会把他的想法公之于众。

那一年內，欧洲北部的光芒骄傲地闪耀四方。在哥本哈根，新的量子论的成功让人们无比喜悦。带着父亲般的喜悦，玻尔惊异于所里年轻的天才研究者所取得的成就，更为他们在量子理论方面一致的声音而陶醉。由于克莱因的帮助和大量硕果累累的讨论，他和海森伯都得以留名史册，取得一样的地位。玻尔相信，不确定原理和互补原理这两个支柱，将会为崭新的原子大厦提供哲学基础。

¹⁴⁶ 1927年10月，在布鲁塞尔的索尔未（Solvay）研究所的一个国际会议上，玻尔骄傲地将量子力学的哥本哈根阐释公之于众（他曾经在意大利的科莫（Como）也作了这个演讲，所以人们一般称之为“科莫演讲”）。他的听众都是现代物理最杰出的人士，包括海森伯、薛定谔、德布罗意、玻恩、埃伦费斯特、洛伦兹，还有认真聆听每一个字的爱因斯坦。

玻尔的演讲完毕，爱因斯坦立即回应他。他尖锐地辩驳完全出乎意料，迅速让一场庆典演变成一场辩论。他反驳道，互补原理无法让人接受，因为它让粒子依靠偶然性运动，人们应该遵从严格的因果律，而不是通过几率方式来解释所有的自然现象。

观众开始骚动，纷纷议论，对爱因斯坦的发言，十几种不同的语言开始辩论，会议主持人洛伦兹试图恢复秩序但徒劳无

功。最终，埃伦费斯特大步走向黑板，随手写下圣经里的一段名言“上帝在那里变乱天下人的言语”，引用巴比伦塔的传说让所有的人顿时捧腹大笑。¹⁴

从那一刻起，索尔未会议成为两位老练的拳击手比赛的舞台。爱因斯坦总是接二连三地举出例子来说明玻尔的阐释不完善，而玻尔随后将其逐一驳倒。埃伦费斯特充当裁判，在两者之间斡旋。事后，海森伯如此描述这场战斗：

论战常常从早餐就开始，这时爱因斯坦会在我们面前摆上一个思想实验，他确信无疑可以就此推翻不确定原理。我们立即检验他呈上的这道新鲜菜肴；在去往会议厅的路上，我跟着玻尔和爱因斯坦，我们会澄清一些要点并讨论它们的联系。一天当中，我们都会深入地探讨那个话题，而且作为惯例，晚餐的时候，我们抓住爱因斯坦实验的要害，从这点出发，尼尔斯·玻尔便能向爱因斯坦证明即使他最新的实验也无法撼动不确定原理，这时爱因斯坦看上去就会略显苦闷。不过，下一个早晨，他已准备好了另外一个新的思想试验——比上一次更加复杂……相同的游戏持续了一段时间以后，爱因斯坦的朋友保罗·埃伦费斯特说：“爱因斯坦，我为你感到惭愧；你现在对新的量子理论的反对就好像当初你的对手攻击相对论一样。”但是即使这份真挚的告诫爱因斯坦也视若无物。¹⁵

爱因斯坦是作为一位物理界德高望重的领导者来到索尔未会议的。他却与会议渐行渐远，成了位不合群的人，而不是领



袖——这也仅仅是因为人们对他早期工作的崇敬，而非他新的观点有任何价值。他永远不会是第一个，也不会是最后一个远离“进步”之人。

索尔未会议三周以前，发生了一件让电影界值得纪念的大事——其意义能与这次物理会议媲美。《爵士歌手》(*The Jazz Singer*)作为第一部有声电影首次出现于银幕上，吹响了有声电影时代嘹亮的号角。当布鲁塞尔的物理学家宣告新的量子体系的奇迹到来之时，纽约的影迷排队体验另一个奇迹：聆听并观看被记录下来的电影明星的表演。

一瞬间，电影制造业的传统方法成为明日黄花。事实上，一夜之间，成千上万的影院连好了线缆，可以播放声音。观众们一旦亲历银幕上载歌载舞的美妙，就会完全沉浸于电影之中，别无所求了。当稍后诙谐模仿的《雨中曲》(*Singing in the Rain*)推出后，电影界所有无声的表演者蓦然发现他们已经失业。只有一个导演，卓别林，依然有本事和毅力在下一个十年继续他的无声电影事业，在诸如《城市之光》和《摩登时代》等电影中，他的无声事业达到巅峰。无论他的同行如何规劝，他强烈地相信自己的技术，不言放弃。

爱因斯坦和卓别林一样，有着独立的思想。他是那个时代反对量子理论、拥护经典决定论的人中唯一的一个声名显赫的物理学家。他全心全意地争辩，无论什么实验都说明宇宙是完全可以预言的。尽管物理界的大部分人都反对他，他还是坚持自己的想法，认为量子现象必须是一个宏大的、完全偶然的框架的一部分。如此这般，在一个热烈的讨论的时代，他的努力似乎成了没人关注的哑剧。爱因斯坦坚持自己的物理图景，不

过他的话语开始被别人当成耳边风。

为了自己的信仰，爱因斯坦必须抗争。他要利用他最强有力的武器：以自己的能力构建统一场理论，一个广泛的理论可以将量子效应作为自然的因果关系包括进去。为了这个目标，¹⁴⁸他几乎奉献了余下的科学生涯，殚精竭虑；他要找到所有物理体系的内在秩序，只要脆弱的身体还能支撑，他那唐·吉珂德式的努力就不会中止。

游访加利福尼亚的过程中，卓别林骄傲地把爱因斯坦带到《城市之光》的首映式。爱因斯坦被这个苦涩而甜美的传奇故事感动——一个贫困但是无私的流浪者救助了一位失明的卖花姑娘，电影的结局让他潸然流下，寂静的银屏上的主人公衣衫槛褛须发凌乱——如此的孤独、被人曲解——但从来没有放弃。爱因斯坦也决不放弃。

五维理论万岁

虽然爱因斯坦被孤立，但他还是无止境地努力投入。他看到了通往统一场希望之乡的两条大道：一条由外尔和爱丁顿铺就，包括了对广义相对论几何基础的修补；另外一条，由卡鲁扎和克莱因打通，需要通过额外的维度扩展现实世界。尽管后一条路看上去更有前途，但也更危险。他如何去假设一个无法观测得到的第五维的存在呢？他觉得，柱面条件过于武断。在这个领域的进步需要更加坚实的解释，但是他不能放弃，放弃意味着把土地割让给玻尔。因此，尽管年近50——一个许多理论物理学家已经从繁忙的岗位上退下来的年龄，爱因斯坦却



要面对不同寻常的两难问题：在这个可能是他研究生涯最重要的阶段，如何实现他所理解的这个世界。

他必须做出抉择。1928年1月，答案很快揭晓。他充满喜悦地给埃伦费斯特写信：“我认为卡鲁扎-克莱因已经正确地指出了解决问题的方法，五维万岁。”¹⁶

于是，带着这种肯定，爱因斯坦开始在他追求的理论的大道上一块一块垒砌黄砖——但是还未抵达那片五维的神奇土地。他沿着这条路追寻自己的目标，经过深思熟虑后，在五维的丛林中迷失了方向。爱因斯坦只好暂时把拓展卡鲁扎的工作放一边，试图绕道再次更改非黎曼几何，这种更改被称为“绝对平行原则”（distant parallelism）^①。绝对平行以外尔理论作为核心，改变了平行线的定义但是保持距离的长度不变。在这个奇怪的世界中，平行四边形不再闭合，它们就像是打破了的窗框一样张开。

外尔、爱丁顿等许多物理学家发现绝对平行与相对论最主要的成就存在很明显的冲突。泡利尤其批判爱因斯坦的做法，他想知道爱因斯坦为什么要设计出一个理论，却不能正确预言光的弯曲，水星轨道的运动。难道爱因斯坦为了向世人证明他的研究仍然至关重要，就要把其他成就统统扔到窗户外面？

但是新闻界热爱这位须发蓬松灰白，却依旧拼命工作，希望解释整个宇宙的教授。由于新方法的公布和他50岁生日几

^① 也称之为“absolute parallelism”，“teleparallelism”，or “Fernparallelismus”，是一个具有黎曼度规、零曲率、非零张量的几何体系。

乎同时，因此对于此次统一场方法的研究，爱因斯坦获得了比以往更多的宣传。但是，他得到的仅仅是单纯的公众的关注，而不是他想要的同行的肯定和尊敬。1929年1月，《纽约时报》在头版报道了这个理论，暗示它可能比相对论更加重要。¹⁷三周以后，另外一篇《纽约时报》的文章报道，所有的公众宣传令爱因斯坦快要发疯，他正在寻找能够远离媒体的地方。¹⁸

爱因斯坦随后就在靠近波茨坦的卡普斯（Caputh）买了一块地，在那里为自己和爱尔莎修建了一座房子。他时常在附近的湖中启帆航行，那艘船是他的生日礼物。在那里，他感觉就像一个流浪汉，惬意地享受独处的快乐，还可以宁静地沉思统一场问题。

那个时候，他找到了一位助理研究员替他做数学计算。他更喜欢把时间花在收获新的想法上，而不是用方程的磨坊来消磨它们。另外，无穷无尽的数学细节的处理也会侵蚀他的创造力。

那个时期爱因斯坦的“计算器”是澳大利亚物理学家瓦尔特·迈尔（Walther Mayer）。迈尔当时已经40岁，为爱因斯坦工作之前，他曾经在巴黎、格廷根、瑞士联邦理工大学和维也纳（他在那里获得博士学位）大学工作学习过，经验非常丰富。他是一个身材矮小、谦逊的人，每逢陪同爱因斯坦参加活动，他总会不事声张地规避到不受关注的地方。

为了得到更多的帮助，爱因斯坦聘请到了一位非常优秀的秘书小姐，海伦·杜卡斯（Helen Dukas）。杜卡斯拥有杰出的组织才能，最重要的是，无论何时，只要爱因斯坦准备与来访

150



者会面，她都可以把约会安排得井井有条；如果不愿意，她也可以保证爱因斯坦不会受到他们的骚扰。直到爱因斯坦逝世，她一直都担任他的秘书，把他的文章一丝不苟地整理好，以备今后需要。

1931年的旅行，迈尔和杜卡斯都陪在爱因斯坦身边。在加州理工学院举行的必需演讲和会议，爱因斯坦都会征求迈尔的意见。虽然他们的合作始于一个与绝对平行原则有关的项目，但是爱因斯坦开始对这个理论的有效性产生了发自内心的怀疑。一位接待过爱因斯坦的人，物理学家理查德·托尔曼谈到，“爱因斯坦对每一个人都非常非常友好。他谈过两次他的统一场理论，我们所有的人都惊异于他的聪明；虽然他自己说这个问题可能是一个‘肥皂泡’，他仍然全力以赴。”¹⁹

深埋痛楚

和卓别林共进晚餐的时候，雷诺兹问爱因斯坦关于“维度扩展”的事，爱因斯坦显得迷惑不解。但是很讽刺，在一定程度上，这就是爱因斯坦下一步工作的模型。这将是第一次明确地冲进卡鲁扎-克莱因的理论世界。

1922年，爱因斯坦与格罗梅合作了他第一篇完全关于高维理论的文章。这篇文章再现了克莱因的模型，但是不考虑应力能张量场，它没能找到一个合理的解。第二个工作成果发表于1927年，回应了克莱因的观点，但是没有提供量子联系。到了1931年，随着绝对平行这间纸房子的倒塌，爱因斯坦决定重回高维领域，这一次需要更大的努力。

高维理论引入了新的物理属性，但是却永远也没有办法观测，这是爱因斯坦对高维理论最大的担忧。他觉得，一切自然模型的结果，都应该能够被实验验证。不久后爱因斯坦与同事英费尔德合写道：“物理理论试图构建一幅事实的图景，并建立它与人们所知觉的宽广世界的联系。因此，对于我们思想结构好坏的唯一的判断标准在于我们的理论是否形成了此种联系，它是如何形成的。”²⁰

因此，为了构建新的卡鲁扎-克莱因模型，爱因斯坦不想提出任何无法检验的“灵魂”一样的东西。因为物理上的额外维度无法直接检测，他和迈尔不予考虑，他们开始寻求更加微妙的东西。就像一位法官决定把罪犯关进大牢，他们有意设计一个理论可以让额外的维度逃不出方程，也不能被现实世界观测。基于此，他们进行了数学上的维度的扩展，而不是物理上的。

在这个问题上，爱因斯坦和迈尔在一篇文章中描述他们的方法，这是一个形式体系，“在心理上和卡鲁扎的著名理论联系在一起，同时避免了物理的连续统的扩展进入第五个维度。”²¹ 研究者们希望通过这种方式，回避超越时空的非现实世界的维度特点，同时也保留了它们在数学上的用处，以利于统一场方法。

他们使用的技术包括，保留时空的四维性，不过仍然在每个点都赋予一个抽象的五维矢量。人们可以将其视为高维的箭头束，这个箭头束从对象的每一个无穷尽的箭头上突出来。这些箭头在抽象的空间中相互作用，而空间只能感受到间接的反馈。因为第五维直接作用在我们生存的空间之外，所以我们永



远也感受不到额外维度的存在。

这个理论听起来前途无量，但是爱因斯坦和迈尔意识到它的局限性。它不能产生出任何量子力学特性，因此用来驳斥玻尔毫无作用。更糟糕的是，如果没有很不自然的假设，它就不能精确描述粒子的经典行为。而且，它不能从几何中产生物质，这是爱因斯坦最主要的目标。爱因斯坦没有任何困窘或者遗憾地再一次转到新的方向。

事实上，在高维或者其他与统一场理论相关的问题上，爱因斯坦反反复复尝试了很多次。于是在1931年他被泡利激烈抨击：

152

〔爱因斯坦〕永不言败的创造天赋和他追求特定目标的无穷精力最近平均一年给予我们一个这样的理论。它们的联系在心理上很有趣，因为当前的理论总是被它的作者在一定时间内吹嘘为“最后的解决方案”。因此，当这个领域一个新的尝试出现之时，我们就可以把历史上一句有名的话稍加修改，惊叫“爱因斯坦老的理论已经死亡，爱因斯坦新的理论万岁！”²²

对泡利的评论，爱因斯坦艰难地思考许久。泡利伤人的话尖锐而充满恶意，但是它们总是一针见血地切中要害。此外，虽然泡利极其尖刻，但是他是极少的几个真正读过爱因斯坦文章并提出意见的物理学家。几个月后，随着爱因斯坦最后一次尝试最终理论的努力付诸流水，他致信泡利：“终究你还是对的，你这个无耻的家伙。”²³

心动的邀请

1932年冬，作为新的年度安排，爱因斯坦再次访问加州理工学院。在那里，他集中对统一场理论和宇宙学做了许多发言，并且和丹麦宇宙学家德西特（Willem de Sitter）商讨了扩展宇宙的一些问题。他也和学术管理者亚伯拉罕·弗莱克斯纳（Abraham Flexner）详谈过，弗莱克斯纳打算在新泽西州（New Jersey）创建一座全新的思想堡垒，科学家可以在那里自由地从事自己课题的工作而不用为大学生活分心，他已经获得一大笔的捐助可以支付各种费用。弗莱克斯纳的提议引起了爱因斯坦强烈的兴趣，同意以后继续他们的讨论。

回到德国，爱因斯坦仅仅逗留两周便启程前往英格兰与爱丁顿等人会面。在牛津大学，弗莱克斯纳拜访了爱因斯坦并带给他关于新的研究中心的更多消息。人们将会知道它坐落于普林斯顿大学，但是与大学保持独立，称为高等研究院。爱因斯坦的眼睛闪着热切的光芒，想着在那样一个安定之所心无旁骛地研究统一场理论该多好啊，弗莱克斯提到可能有适合他的职位。

接着在那一年卡普斯举行的会议上，他们解决了细节问题。爱因斯坦将每年拿出5个月的时间在普林斯顿，大概是以取代对帕萨迪纳的访问。虽然他很谦虚地几乎没要什么报酬，但是弗莱克斯纳还是向他保证他可以得到丰厚的薪水、差旅费甚至包括出租车费用。爱因斯坦兴高采烈地同意了那些条件。当弗莱克斯纳乘上公交出了城，他悬在心上的石头终于落

153



下——一切都安排妥当了。²⁴

但是几天后，爱因斯坦给弗莱克斯纳一封表示感谢的短信，问题也随之而来。爱因斯坦接受此职位之前，他必须保证要迈尔做他的全职合作者。“现在我希望是迈尔博士——我杰出的合作者，也可独立于我接受正式的邀请，”爱因斯坦写道，“直到现在，他还在忍受着自己的才能和成就还没有得到人们应有的承认的痛苦。他应该觉得是因为自己的成果才被邀请，而不是得到了我的什么好处。”²⁵

当弗莱克斯纳断然拒绝这个要求后，爱因斯坦暗示他想接受另外一个工作机会。作为补充，爱因斯坦接下来又给弗莱克斯纳一封信，说他正在考虑西班牙的一个职位，这个职位允许迈尔作为全职教授，当他的助手。弗莱克斯纳明白此中的弦外之音，勉强同意爱因斯坦的要求。

逃出德意志

正值第一次世界大战，德国的经济环境日益糟糕，大量的失业和货币贬值迫使人们不顾一切地想办法维系生活。假借宗教、种族和政治上的替罪羊等手段，极端保守主义的政治力量日趋膨胀。

爱因斯坦同情左派，他希望大部分公众能从根本上削弱纳粹的仇恨宣传。他和爱尔莎还一度乐观地相信，他们可以安全躲过暴风雨，每年至少有一部分时间可以留在卡普斯。

¹⁵⁴ 他宣称支持反法西斯活动，这场活动由社会民主党和共产党联盟发起，旨在阻止纳粹取得胜利。



阿尔伯特·爱因斯坦和瓦尔特·迈尔在一起。迈尔作为爱因斯坦的“计算器”，试图发展出统一场理论。

一个个可怕的打击接踵而来。1932年7月，纳粹在政治选举中赢得了多数票。虽然此时希特勒尚未执政，但阴云已笼罩着整个欧洲，笼罩着所有珍爱自由和文化多样性的人民。果真，不久整个欧洲大陆都被轰隆隆的枪炮声和军靴雷动的行进声淹没，充满活力的理性文明被铁蹄践踏，到处满目疮痍。几



乎整整一代独立思想的人们，被迫从燃烧着熊熊烈火的房中逃离祖国；而那些未能及时逃走的人，在毁灭的大火中，与成千上万被谋杀的受害者一同陨灭。

155 1933年的冬天，当爱因斯坦第三次去帕萨迪纳的时候，听说了希特勒就职执政的消息。和其他几次旅居一样，他和托尔曼进行了富有成效的讨论，也和他的朋友们度过了愉快的时光。卓别林数次宴请他，一次，爱因斯坦让他的东道主吃了一惊，他带上了三个乐手，和他们一道演奏莫扎特的四重奏。看着这位教授满怀热情地演奏小提琴，卓别林非常开心。还有一次拜访卓别林，爱因斯坦和许多有名望的客人共进晚餐，马利恩·戴维斯（Marion Davies）——威廉·伦道夫·赫斯特声名狼藉的女人，她的指尖厚颜无耻地滑过爱因斯坦著名的蓬乱的头发，说“你为什么不剪头发？”²⁶

当爱因斯坦知道德国发生的一切，欢笑嘎然而止。作为一位犹太人和社会主义者，他以反对法西斯主义和军国主义闻名；他知道只要希特勒执政，他就永远不能回去。因此，他结束旅行，从加州返回，需要不惜一切代价绕开德国。

爱因斯坦乘船来到比利时，开始切断与德国的关系，他从普鲁士的科学院辞职，放弃德国公民身份。学院的一个秘书是纳粹的支持者，作为回应，他代表学院要对爱因斯坦做出裁决。耻辱的是，除了劳厄，没有任何一个学院成员抵制这一裁决，几乎一夜之间，学院心爱之人成了替罪羊。

爱因斯坦在比利时的勒库苏玛（Le Coq sur Mer）的海边小镇上租了一间村舍，他在这里认真考虑自己的将来。很幸

运，不像他许许多多的同行，他有大量的机会。他收到了牛津大学、马德里大学等许多大学的邀请。其中，爱因斯坦对密立根掌管下的加州理工学院物理系兴趣最大。接着，弗莱克斯纳邀请他来到高等研究院，为了更深入地研究，他在那里将计划停留的时间延长到了一年。爱因斯坦脑子一团糟，他多方协商，准备到最后一刻才做决定。

虽然加州理工学院很诱人，爱因斯坦最终还是同意了弗莱克斯纳慷慨的提议。历史学家杰拉耳德·霍尔顿叙述道，“他做出这种选择的原因是他知道在加州理工学院，他将不能忍受密立根等人的炫耀，因为他曾经三次到加州理工学院开展募捐活动是部分原因——而普林斯顿不同，人们不会干涉他的工作和生活。而他希望独处，所以他选择了普林斯顿并且在那里过得很快乐——他可以穿着他邋遢的毛衣到处走动，而不必一定要穿上晚礼服参加又一场“橘郡富豪”的宴会²⁷。”¹⁵⁶

哀悼埃伦费斯特

爱因斯坦取道英格兰朝美国出发，随行人员有海伦·杜卡斯、瓦尔特·迈尔和爱尔莎。他将驶出南汉普顿，开始最后一次跨洋之旅，与欧洲永别。

爱因斯坦逗留英格兰时，得知了他最亲爱的朋友的死讯，顿时如五雷轰顶。1933年9月25日，保罗·埃伦费斯特抑郁中绝望地射杀了自己的儿子，接着也了却自己的生命。这位杰出的教师和学者确信自己的存在毫无价值。

埃伦费斯特自杀的原因相当复杂。一辈子的自卑如影随



形，他相信他的成就永远也无法与同行相提并论。特别是他在莱顿大学接替洛伦兹的职位，让他觉得自己犯了个愚蠢的错误。谁让他与欧洲最著名的科学家站在一个位置上呢？

他不仅拿自己与洛伦兹比较，也与爱因斯坦和玻尔相比。很有幸，他最好的朋友都创立了整个思想领域，这让他如坐针毡，觉得自己那么愚笨无能。同时，他也被别的诺贝尔奖得主包围，却一点也帮不到他。况且面对量子理论的飞速发展，他心有余而力不足，逐渐被甩到后面。

埃伦费斯特的私人生活一塌糊涂。他疏远塔姬雅娜，倒在另一位少妇温暖的怀中，一个艺术家般感情炽热的女人。他用和知书达理的妻子多年的情谊为代价，换取渴求的感情滋润，以此让自己体会到安全感。然而，他却是一个诚实正直的人，如此的风流韵事让他承受极大的精神负担。最后，他希望和妻子和解却不知从何着手。²⁸

157 接着是瓦希特（Vassik）的问题。他是埃伦费斯特最小的儿子，患有唐氏综合征。数年以前埃伦费斯特把他安置在德国耶拿一个不错的看护所。但是，随着希特勒当权，他日日惊吓纳粹会如何对待一个有缺陷的半犹太血统的男孩。埃伦费斯特把瓦希特从德国救出来，送到阿姆斯特丹的收容所。这个孩子的照料费用格外高昂，这是他忧虑的另外一点。

埃伦费斯特被沉重的经济负担压垮了，他多么希望能像爱因斯坦一样，在美国找到新的工作。他联系了托尔曼等美国朋友，恳求他们为他在加利福尼亚或者东海岸找份工作，什么工作都行。²⁹ 他们多处咨询，依然没能帮他找个合适的位置。

埃伦费斯特的传记作者马丁·J·克莱因叙述道，“大概最

后一年左右，埃伦费斯特竭力挣扎，希望找到一条路可以挣脱目前完全无法想象的处境。他极其努力地去寻找一份待遇很好的工作。他原以为自己可以找到这样的工作，让家庭甩掉包袱，最后他终于明白自己没有任何出路。”³⁰

希望尽失，埃伦费斯特给爱因斯坦、玻尔、托尔曼等朋友写了封告别信，其中诉说他已经完全无法容忍这样的生活，并对自己即将要做的事情道歉，这封短笺永远也没有投递。紧接着，他在收容所的等候室与瓦希特见面并杀死了他——很显然，埃伦费斯特希望缓解家庭重负。最终，他也夺去了自己的生命。

在让人潸然泪下的悼词中，爱因斯坦赞扬他已故朋友充满激情的教学方式，对学生无私的鼓励。可能为了表明自己的关心，他推断自杀是因为埃伦费斯特在学校遇到了麻烦，以及年过50后的诸多艰辛。待爱因斯坦和埃伦费斯特的其他朋友理清整个情况，为时已晚。

对爱因斯坦来说，深深的悲恸难以用言语形容。开始丢掉了祖国，现在“兄弟”又离他远去。当他的船驶入这个新的世界，唯独时间的海洋才能让他远离苦楚，最终抹平他的伤痛。

被放逐的真理

——在普林斯顿创建理论

激励着爱因斯坦前行的，并非世界运行的微妙逻辑，而是其不可言喻之美感。他总是在工作中寻找美。同样，他义不容辞地寻找宇宙神奇简单的定则，心里头这种深刻的宗教感让他满怀激情地努力……有一次我问他某个理论，他说：“当我评价一个理论的时候，我问自己，如果我是上帝，我会这样去创造宇宙吗。”如果一个理论不具备上帝要求的简单之美，那它可能只是一个暂时的理论。

——班尼斯·霍夫曼，《与爱因斯坦共事》

彼特·伯格曼曾经告诉我，（发展统一场理论的时候）总会有初步阶段，爱因斯坦一视同仁地对待这些理论。接着，他就好像花园中的园丁，拾起植物，仔细观察它的根部。认真检查后，他的态度变得挑剔。一段日子后，他便做出一个新的理论。整个理论的发展过程，他的情绪变化往往是不做评价，然后自我批评，接着又是不置可否，周而复始。

——约翰·斯塔赫尔，物理学家和历史学家

狡猾，但不邪恶

1913年10月，爱因斯坦抵达美国，事实证明这是他最后
 一次迁徙。此次来到美国，较先前的来访，充满无奈。亚伯拉
 罕·弗莱克斯纳安排人直接把他从船上带到纽约移民处理中心，
 秘密而迅速，紧接着将他从那里径直送往普林斯顿，毕竟
 弗莱克斯纳担心这位诺贝尔奖得主中途会出现什么意外。纽约
 市长本想会见爱因斯坦，并发表一番演讲，以示炫耀，结果最后
 就像被突然抛弃的新娘。

一到普林斯顿，爱因斯坦就非常开心，因为他的私人壁炉
 已经先他数年到了这里，此刻他备感温暖。在研究院拥有自己的
 房子之前，他们学院和大学自身的数学系在共同分享工作地
 点，而科学部的主任奥斯瓦尔德·维布伦（Oswald Veblen）
 正在谨慎地筹划属于他们自己的壁炉甚至整个新的建筑。维布
 伦想象，学者们可以在一个舒适的房子里品茗香茶，一个个美
 妙的想法接踵而来；同时相互之间交换抽象的观点，建成的这
 座楼就是以后著名的“范式大楼”（Fine Hall），而与所有办
 公室紧邻的茶室成为研究中心最突出的特色。数年以前的一次
 讨论会上，维布伦碰巧无意中听到爱因斯坦的评论“上帝狡猾
 （大工大巧之意）但不邪恶”。于是设计这个茶室的时候，他致
 信爱因斯坦，希望允许把他的这句话（用最原汁原味的德语）
 刻在房间的壁炉上。不过，他完全没有想到，这句话不久以后
 成了师生茶余饭后挂在嘴边的格言。

不过维布伦对爱因斯坦统一场理论的工作，特别是他和迈



尔合作的，关于对卡鲁扎理论进行改进的文章非常感兴趣却在情理之中。爱因斯坦-迈尔的文章与维布伦和他毕业生班尼斯·霍夫曼 1930 年合作的文章极其相似。和爱因斯坦-迈尔模型一样，维布伦-霍夫曼的工作被称为“投影相对论”（Projective relativity），其中引入了一个第五维的维数，它是对内部数学空间的扩展，而非外部物理世界的延伸。通过这种方法，两种模型都神奇般地把五维变成四维，从而避免解释额外维数的物理意义这样的困难。1931 年，维布伦在一封致爱因斯坦的信中，很礼貌地说：“今天早晨《纽约时报》报道了您最近在统一场问题上得到的一个新的解，看上去它精确地告诉人们如何解决统一场问题，而这个问题的解一年以前便由我的学生霍夫曼先生和我发表。”¹

160 不过，维布伦一直对爱因斯坦满怀着友善。也是在这封信中，他希望爱因斯坦能够访问范式大楼，并且看看镌刻“狡猾，但不邪恶”的壁炉。两年后，随着爱因斯坦的到来，维布伦的美梦成真。

爱因斯坦刚到普林斯顿的时候，维布伦已经和霍夫曼道别，这边没有人可能和他一起研究投影相对论。虽然维布伦和爱因斯坦彼此敬重，同样对卡鲁扎理论的修正感兴趣，但是他们从来都没有机会共事。爱因斯坦有他自己的想法，他喜欢以自己的方式独立思考——仅仅需要一位可以直接指导的助手帮助即可。不过总的来说，普林斯顿缺少合作氛围，这让维布伦很失望；虽然他想将范式大楼建成一个学者们相互讨论的地方，但是他很遗憾地没有看到这个结果。“这里所有的数学家”，他曾经对霍夫曼说，“他们一个月见一次面，然后各自回

到舒服的小窝里，整整一个月不和其他数学家见面，就像在里面研究精神病症状。”²

与此同时，这位生于英国学于牛津的天才数学家在罗彻斯特大学找到了工作，他很巧合地得到这个职位。当时柯达的创始人乔治·伊斯曼（George Eastman）刚刚去世，捐赠数百万美元给这所大学。得知这个消息，霍夫曼给大学写信问道这些钱是不是可以提供一些工作的机会。很幸运，在人才市场吃紧、找不到工作的时候，霍夫曼得到了这个机会。

离开普林斯顿到罗彻斯特之前，霍夫曼曾经满怀希望地给爱因斯坦写信，询问道是否可以与之合作。³ 信中除了列举他在科学上的能力外，霍夫曼也提到他的音乐才能——和世界上最著名的业余小提琴家共事，很明显这是一个非常吸引爱因斯坦的地方。虽然爱因斯坦表达了对霍夫曼工作的兴趣，但他没有办法再找一个新的助手。那个时候，他的收入只能支付得起一个助手。

在罗彻斯特，霍夫曼将卡鲁扎-克莱因理论推广到具有电荷和磁属性的实体粒子，研究他们在五维中如何运动的问题。¹⁶¹ 在一连串的信件中，他忠实地告之爱因斯坦他的发现。爱因斯坦发现霍夫曼的研究非常有意思，当1936年维布伦把他带回普林斯顿后，爱因斯坦非常乐意与他合作。

请赐予我助手

研究助手的问题依然是爱因斯坦的痛心之处，主要表现在弗莱克斯纳和研究所的关系上。弗莱克斯纳也很郁闷，因为为



了让迈尔在这里得到永久自由的职位，爱因斯坦给他太大压力。因为他们之间的协议，他代替爱因斯坦为许多事情承担责任。

一来普林斯顿，迈尔表现出对爱因斯坦的极度不满，他仅仅与爱因斯坦合写了一篇文章便对合作失去了兴趣。于是，他不再进行统一场理论和与相对论有关的工作，他选择了离开，开展纯数学的研究。尽管他还在研究所，但是对爱因斯坦的工作没有了任何帮助，爱因斯坦的计划事与愿违，毕竟迈尔的工作太独立。因为迈尔占据了一个终身教授职位，弗莱克斯纳最开始不允许爱因斯坦任命其他人为他诚恳地工作。因而爱因斯坦数年来，都受困于没有一个真正的助手。

损失了迈尔，爱因斯坦没有了他的“计算器”。但是他已经习惯于让迈尔为他进行一切必要的计算，自己可以腾出大量的时间思考他庞大的物理图景。他就像一位年长的工程师，需要充满活力的年轻工作者完成他的构想。此时弗莱克斯纳并不同意为他提供任何助手，他只得请求别人的帮助。只要遇到有数学才能的访问者，爱因斯坦就会殷勤地邀请他们为他的项目做点事。不过爱因斯坦运气不错，研究所到处都是这样的能人，所以爱因斯坦很快就可以恢复他的工作——虽然他关注的目光与以往略有不同。

数年时间内，爱因斯坦找不到统一自然力的肥沃土壤。也可能，那些来研究所的访问者都呆不了太长的时间，在一个长远的项目上，不能给予他足够的帮助。于是这个宏伟的工程暂时休耕，¹⁶² 他开始在更加主流的问题上耕耘。回到标准的广义相对论和量子物理这些基本问题，他有能力种下深刻而尖锐的思

想的种子。这些想法，经过他的合作者们不断地培养，促进它们的生长，终于开花结果，造就了几篇意义深远的文章。

罗森（Nathan Rosen），从麻省理工学院（MIT）拿到博士学位不久就来到普林斯顿准备研究分子物理。但是，当他和爱因斯坦讨论完毕，他开始着迷，让人惊异地改变了抱负。不久，他们一同工作，希望避开数学上的令人厌恶的奇点，导出广义相对论的解。他的另外一个项目，是和物理学家波多尔斯基（Boris Podolsky）一道，推出了对量子不确定性具有决定意义的反驳，一个激起人们深入思考的论证，被称为 EPR 佯谬，它让玻尔怦然心动。爱因斯坦还和罗森检验了引力是否可以通过波传播的问题，并研究了相对论粒子如何运动、相互作用。

最后一个题目，被称为运动问题，吸引了为数不少的研究所的访问者加入爱因斯坦的小组。包括班尼斯·霍夫曼，他无需怎么劝说就开始了等候已久的同爱因斯坦的合作。利奥波德·英费尔德也是如此，他是一位生于波兰的研究者，回到柏林时就耳闻爱因斯坦大名。霍夫曼回忆他和爱因斯坦见面那天有多么紧张：

我做过一些相对论的计算，一个朋友就建议我拜访爱因斯坦，问问他对我工作的意见。我觉得去见爱因斯坦完全是个荒谬的想法，我太害怕了，我的朋友几乎是把我推到爱因斯坦的办公室门口。我轻轻地敲门，就听到爱因斯坦用升调，友好地说了一声“进来”。我惊慌失措地进去，看到爱因斯坦正坐在一把舒适的椅子上，衣服邋遢，头发



扭扭曲曲，嘴里含着一支烟斗，膝盖上放着一打纸，全是算式……他微笑着友善地让我把我的公式写在黑板上，然后说了一些话，我一直记得他说：“请你慢一点，我理解东西没有那么快。”这居然从爱因斯坦的口中说出！一瞬间，就像变魔术一样，我的恐惧荡然无存。⁴

爱因斯坦给霍夫曼和英费尔德两个题目供他们选择，但是他们都对运动问题最感兴趣。他们和爱因斯坦一道，证明了广义相对论的场方程可以描述粒子的运动，就像牛顿物理中的那样直接。这让广义相对论理论的基础更加坚实。

统一场论和这些理论一样迷人，爱因斯坦仍然寻找机会回到这个问题。他热烈地希望在普林斯顿能够有机会继续构思和检验各种各样的方法。爱因斯坦非常幸运地从两个聪明年轻的助手彼得·伯格曼和瓦伦丁·巴格曼（Valentine Bargmann）那里得到了需要的一切帮助。

母亲的央求

彼得·伯格曼生于1915年3月24日，继承了皇家的科学血统。他的父亲马克斯·伯格曼是蛋白质化学后起之秀，老伯格曼在柏林大学诺贝尔奖得主化学家埃米尔·费歇尔（Emil Fischer）实验室工作，他分析了氨基复杂的长链结构。费歇尔1919年去世后，他继承了新的贵族头衔，并继续突破性的研究。接着在1921年，他被任命为德斯顿皮革研究所的主任，这个研究所刚刚由威廉皇帝（Kaiser Wilhelm）创立，在这里

伯格曼的工作开始闻名于世界。

彼得的母亲埃米·伯格曼是位受人尊敬的儿科医生和教育家。她在柏林的维多利亚女皇医院工作，在此期间她慢慢对儿

164



彼得·伯格曼作为爱因斯坦的助手开始职业生涯。他成为量子引力的奠基人之一，还是广义相对论研究有影响的人物之一。

童权利和福利产生浓厚的兴趣，对这些方面的提倡拓展了她作为一位母亲的责任。她带大了彼得和彼得的妹妹伊斯特（Esther），并鼓励他们成为具有独立思想的人，在他们成长的道路上提供一切必要的支持。她是音乐训练坚定的信仰者，注意培养彼得的小提琴天赋。据说，彼得拥有完美的乐感。⁵

幼小单纯的彼得被温暖的毛毯紧紧裹着，他哪里知道父母的婚姻已经难以维持。马克斯得到新的贵族头衔不久，便与埃米平静地分开。埃米带孩子移居到德国西南部的山林地区，一



个新奇而陌生的城市弗赖堡，并定期带他们看望父亲。她没有勇气告诉孩子们，他们的父亲正在和另外一个女人，年轻的玛撒在一起。马克斯 1926 年与埃米离婚，娶了玛撒。

埃米的姐姐克拉拉·格伦沃（Clara Grunwald）是知名的教育家玛丽亚·蒙台梭利（Maria Montessori）关系密切的同事，她把蒙台梭利以儿童为中心的教育方式带到了德国。埃米以自己的方式汲取了这种教育理念，并效仿她的姐姐，在居住的城市弗赖堡建立了自己的学校。包括她的两个孩子，她一共接收了二十多个小学生，意识到他们具有成为思想家的潜力，她通过数学和其他教育材料帮助他们。

在这种自我引导的环境的启发下，彼得获得了成为一名独立思想的科学家所必需的技能。看上去，数学工具在他以后对自然的多维几何结构的探索中，起了不可或缺的作用。他很快离开了学校，毕业时年仅 16 岁，接着开始了大学生涯。从那个时候开始，他决心做一名理论物理学家。

他也抱着非常执着的信念追求浪漫生活。他与一位年轻的女孩——一位能分享他科学上兴趣的女孩玛戈特（Margot Eisenhardt）邂逅，每每想念她时，他都会蹬几十千米的自行车穿越浓密的山林去找她。⁶ 他对自己充满自信，他的丘比特之箭正中目标。1936 年他们终成眷属，共度 65 年的幸福时光。

¹⁶⁵ 彼得过得一帆风顺，直到希特勒当权，顿时社会动荡不安。彼得对相对论感兴趣，但这是被纳粹制定的新的雅利安

人^①教义所禁止的，因为它和爱因斯坦有联系。而彼得的种族背景让事态更加糟糕，作为一名犹太男孩，研究所谓的“犹太科学”，在纳粹专制下他的人生不可能有任何前途。

埃米明白她必须行动起来，帮助彼得离开这个国家，并让他大学毕业后得到合适的教育。但是把他送到哪里去呢？为了得到帮助，她决定致信爱因斯坦。纳粹时代以前，爱因斯坦造访的欧洲的研究单位中，有些地方她前任丈夫也去过，比如威廉皇帝协会（即现在的马克斯·普朗克协会）。或许他会同情这个成长中的聪明年轻的科学家的困难处境，她甚至希望，爱因斯坦能够收彼得做学生。

她的信中，描述了彼得在数学和物理上特别的才能，也提到了他的小提琴天分。她并不知道爱因斯坦计划去美国，她原以为爱因斯坦会一直留在巴黎，而彼得会在那里在他的监护下学习。她也不知道爱因斯坦从来不接收大学毕业生，他只要训练有素的助手。信的末尾，她哀恸家庭糟糕的经济情况，希望他的孩子能够在某个地方找到一份有前途的科学工作。这封信被偷偷带到比利时的勒库苏玛，爱因斯坦当时的居住地。

爱因斯坦在回信中鼓励她，他很高兴这样年轻有才的学生有意与他一同工作，他建议埃米把彼得送出德国攻读博士学位。他给了个很好的提议，让彼得去苏黎世跟着沃尔夫冈·泡利学习，得到博士学位之后，他将热诚地欢迎彼得到普林斯顿研究院和他工作。

埃米非常重视爱因斯坦的建议。很明显，作为导师，泡利

① 在纳粹用语中，指非犹太教徒的白种人。



是个很不错的选择。但是很不幸，苏黎世大学的学费贵得出奇。作为另一候选，布拉格大学则便宜得多。因此，主要因为经济原因，彼得只能选择去布拉格从师菲利普·弗兰克 (Philipp Frank)⁷。当爱因斯坦多年前离开布拉格后，弗兰克就取代了他的位置，不久后出了一本有名的爱因斯坦传记。尽管他没有泡利那样有才华，那样有名气，不过他也是位受人尊敬的学者，因此也是很可靠的选择。法兰克沿着两条道路，相对论和量子物理指导彼得，为他以后和爱因斯坦一同工作做准备。

瓦亚的旅行

166

很巧，大概就是那个时候，另外一名聪明的学物理的男孩，姓和彼得非常像，在不知情的情况下，走上了爱因斯坦建议彼得的道路。看到离开德国的紧迫性，瓦伦丁·巴格曼，柏林大学俄国籍的犹太学生，决定逃往瑞士，在苏黎世大学继续他的求学生涯。尽管瓦亚 (Valya) ——他的朋友如此称呼他——在物理学家温特泽尔 (Gergor Wentzel) 的指导下拿到了博士学位，但是他的数学天赋被泡利敏锐地觉察到。因此，泡利没有认识伯格曼，而是慢慢熟悉了巴格曼。

巴格曼生于1908年4月6日，柏林。他是一位安静的勤奋的并且有很好组织才能的学生，在数学上独具禀赋。他还是一名有天赋的钢琴家，在公众场合，他喜欢独奏或者为别的音乐家伴奏。⁸ 与爱因斯坦一同工作后，这被证明是一项非常重要的才能。

巴格曼并非一帆风顺地来到高等研究所的。1936年，他拿到了博士学位，这时他不能留在瑞士，因为这个国家不接受移民，他和父母一同逃到了立陶宛。很幸运，他的父母认识一位美国领事馆的秘书，他给巴格曼弄到了一个签证。在他的护照还有两天过期时，巴格曼刚好移民过去了。

一到美国，巴格曼没有任何归宿，于是他写信给泡利。泡利指引他到安阿伯去。但是，到了之后他发现那里没有任何资金可以资助他的工作。因此，他改道前往普林斯顿，在那里他遇到了著名的数学家约翰·冯·诺伊曼（John von Neumann），诺伊曼任命他为研究所无薪员工。

在此期间，巴格曼发现了自己很有兴趣参与爱因斯坦的工作。赫尔曼·外尔，因为纳粹恐怖逃离格廷根来到普林斯顿，他向爱因斯坦介绍了巴格曼。不久，爱因斯坦热情地邀请巴格曼作为非正式助手与他合作。

艰苦的家庭

1937年，当瓦亚·巴格曼来到研究所，彼得·伯格曼已经在那里工作了一年了。当伯格曼将要从布拉格毕业，他写信给爱因斯坦，把自己的父亲作为介绍人。信中，他提到自己对把量子力学统一到相对论中非常感兴趣。⁹ 最开始彼得很失望，因为爱因斯坦没有回复他。等了一个月，彼得再次提笔重新写了一封信，这次他收到了友善的回复，爱因斯坦热情地邀请他做自己的正式助手。因此，彼得的职位要比瓦亚正规。

不久，彼得找到迟迟不见爱因斯坦回信的原因。爱因斯坦

167



中途写信给菲利普·法兰克询问彼得是否值得信赖。法兰克热情洋溢地回复爱因斯坦后，爱因斯坦觉得把彼得带到普林斯顿非常合适。

那时，彼得的父亲也移民到了美国。马克斯·伯格曼和别的德国籍犹太科学家一样，被要求从德斯顿的工作岗位上强迫“退休”。不过他的运气很不错，杰出的物理学家西蒙·弗莱克斯纳（Simon Flexner），亚伯拉罕知名的兄弟，知道马克斯的才能，就在纽约洛克菲勒（Rockefeller）研究院的医学部（不久后成了洛克菲勒大学）给了他一个享有声望的职位。很凑巧，西蒙·弗莱克斯纳正是这个研究院的主任；而这时亚伯拉罕·弗莱克斯纳恰好也在负责彼得当助手的研究院。

马克斯·伯格曼在洛克菲勒很受人敬重，他吸引了许多才华横溢的生物化学家来到他的系，包括后来的诺贝尔奖得主斯坦福·穆尔（Stanford Moore）和威廉·H·斯坦（William H. Stein）。伯格曼的试验室在蛋白质和酶的性质研究上获得了国际声誉。让马克斯格外自豪的是，他写信给国外学者安置紧急委员会，帮助许多其他移民科学家在美国找到工作。

有一次，石油公司致信爱因斯坦，他们需要一位化学家。爱因斯坦收到信后，把这个信息转给马克斯·伯格曼——他自己并不认识这方面的人，而马克斯·伯格曼立即找到了一位因种族歧视法而移民过来的意大利化学家。马克斯很高兴地把名字告之爱因斯坦，并借此机会表达了对爱因斯坦的深深感激，¹⁰感谢他对儿子彼得事业的帮助。

彼得的母亲待在德国直到第二次世界大战爆发，她的人生就没有那么幸运。在纳粹统治下，以儿童为中心的教育方式没

能继续。眼睁睁地看着自己教育的成就在她的身边被碾成粉末，1939年她逃到了巴勒斯坦。她那更加出名的姐姐，克拉拉·格伦沃仍然留在德国，最后在奥斯威辛集中营被害。

“伯格”和“巴格”

巴格曼连同伯格曼成为爱因斯坦两个最亲密的助手的时候，爱因斯坦正住在玛莎街一间白瓦覆盖的房子里，从他的住所沿着路走下去可以径直到普林斯顿大学。考虑它比周围的许多房子都要小，并且住着非常著名的主人，这座房子便显得格外端庄朴素。爱因斯坦喜欢步行或者蹬车从住所到他的办公



在人生的最后数十年内，爱因斯坦在普林斯顿的这座房子中工作生活。



室，回来的路上偶尔会买一个冰激凌。

169

爱尔莎于1936年12月逝世，距他们搬到这里仅仅一年多。随着她的离去，爱因斯坦把注意力更多地放在研究上，甚至连原来允许自己参加的各种社交活动都规避了。他的琐碎生活完全由海伦·杜卡斯一人处理，她也在这个房子里生活。因为爱尔莎的去世，她成了管家、总经理以及密友、私人秘书。爱因斯坦的继女玛戈特也和他们住在一起。

杜卡斯具有天生的幽默感。她调侃爱因斯坦的两个助手的相似名字，亲切地称呼他们为“伯格”和“巴格”。¹¹多年来，这成了一个经久不衰的笑话。

沿着爱因斯坦住的那条路走下去住着物理学家约翰·惠勒（John Wheeler），他的妻子珍妮特（Janette）和他们的孩子。惠勒是赫兹费德的学生，也是玻尔亲密的合作者，是原子结构模型的先驱。虽然广义相对论和他学的东西很远，但是他仍然非常崇敬爱因斯坦，以后成了引力理论的重要的解释说明者之一。

惠勒回忆见到爱因斯坦步行来去研究所，伯格曼和巴格曼跟在身边的情景。“我记得我总可以看到他们在一起。我总是觉得他们比爱因斯坦体型小，因此爱因斯坦占据了这幅图的主要位置。一天，爱因斯坦打电话给我说，‘你孩子的小猫跑到我的屋顶上去了。’那家伙跟着他们三个人从研究所一直到他的家中。我便问那猫它是不是学到了什么东西。”¹²

爱因斯坦和两个助手的日常工作井井有条。每天早晨，他们在爱因斯坦的办公室一起讨论各自想法。他们会把自己计算的结果拿给爱因斯坦看，并就下一步如何进行征求他的意见。

即使他自己一个方程也没有仔细推敲过，爱因斯坦还是可以给出详细而深刻的意见——经常鼓励他的助手继续，有时突然让他们转变方向。每当他们对困难的任务感到沮丧，觉得应该把脑袋往墙上使劲撞去时，爱因斯坦就会安慰他们，“为此世界已经等待很久，”他会告诉他们，“再过一两个月，也不会有很大不同。”¹³

午餐的时候，爱因斯坦就会离开范式大楼，回到家中。一般来说，下午他都会独自思考，不过有什么情况的话，可以征求他的意见。他的助手时常会在家里给他打电话；另一些时候他们会顺便拜访。否则，他们就一心一意地埋头计算，为第二天和导师的会面做准备。

170

两个助手顽强的毅力让人吃惊。放弃了一种理论形式，爱因斯坦就会立即提出另外一种。就像伯格曼评论的，“只要爱因斯坦研究一种新的场理论模型，他可怕的热情就会持续数个星期到几个月甚至一两年。但是当爱因斯坦首先发现了一个致命的缺陷，就将前功尽弃。这时，爱因斯坦会非常无情地停止这种理论方法的研究，而总是在数天之内，他就能提出一个全新的观点。”¹⁴

音乐经常可以令他精神焕发。当爱因斯坦从欧洲逃离，他的钢琴是他想尽办法留住的最珍贵的私人财产。它占据了一楼的整整一个房间。很自然地，爱因斯坦也带上了心爱的小提琴，也会定期把它拿出来练习。优美的旋律从这个物理学家的手中飘出来，书写方程时的紧张顿时消散。“他热爱表演。”¹⁵伯格曼回忆，爱因斯坦喜欢一时冲动拿起提琴独奏。

爱因斯坦至少一周一次邀请伯格曼等人一起表演室内乐，



他们的保留曲目有莫扎特、巴赫、舒伯特以及维瓦尔第的作品。巴格曼发现“和他一起演奏音乐非常令人愉悦”，¹⁶ 间歇的音乐让他们充满活力，接着又会兴高采烈地继续工作。

航行是爱因斯坦另一种放松方式。当他坐在小船上，流经长岛海湾（Long Island Sound），他发现这种经历如此美妙。波浪砰然撞在他名为 *Tinef*（大概的意思为“无价值”）的小船上，微风拂起他的长发，他就像大海上的斯托科夫斯基（Stokowski）^①，指挥一曲高亢的贝多芬的作品。而当空气慢慢宁静下来，航路也无需调整，他享受着思想的静谧，就如海洋一般的幽深永恒。接着，他的思想开始在时空的洋流中漫步，幻想一首伟大的数学交响曲，可以表达出环绕在他身边的无尽的美丽。离开带着腥味的海风和咸涩的海水，爱因斯坦回到普林斯顿，怀着更大的决心，去发现自然这部伟大乐章的旋律和音符。

汝不得有罪

¹⁷¹ 与伯格曼和巴格曼一起，爱因斯坦开始重新考虑卡鲁扎-克莱因理论，这是他最后一次，也是最全面的一次高维统一场的尝试。他们不断努力，希望系统地把引力和电磁力合并到单独的一个理论中，这个理论将是对爱因斯坦广义相对论标准方程的拓展。在此艰难的旅途中，爱因斯坦远比上几次的眼光开

① 斯托科夫斯基（1882~1977），英裔美国指挥家，曾指挥费城管弦乐队（1914~1936）等主要交响乐团。他于1962年创建了美国交响管弦乐队。

阔，他尝试在原有理论上，进行更加深刻的改进，甚至考虑一个物理上额外维度的可能性。

他的助手们很清楚地明白，就像当初爱因斯坦在一个未知的疆土引导他们一样，爱因斯坦有许多雷打不动的观点，他认为有些特点统一场理论应当具备，而另外一些绝对不可能是它的一部分。尽管他讨厌把科学和宗教（传统意义上的宗教）混成一谈，不过他的一些指导性的意见却带着圣经的口吻。爱因斯坦判断“万有理论”合理性的根据便是上帝会不会以这种方式创造我们这个世界。在这种意义上，他的引导即是尝试解读神的选择。“让我看看，如果我是上帝的话我会选择哪个？”¹⁷当面对选择时，他经常这样评论。

就像大臣对民众们的劝诫，爱因斯坦让他的助手知道理论中哪些东西是美妙的，哪一些是不该出现的、罪恶的。助手们知道了他的嗜好，就勤奋工作让他们的模型更加“美好”，少一些“罪恶”。例如，在理论中引入任何与概率有关的概念，便是原罪之一，任何与原子跃迁有关的类似的东西都明令禁止。因此，即使认识得到克莱因的贡献，他也一如既往不会采用克莱因理论中五维与量子的那种联系。

克莱因晚年有一次访问普林斯顿，恰好问道爱因斯坦对二次量子化有何看法。爱因斯坦回答道，“二次量子化，那是罪恶的平方。”¹⁸在哲学意义上，爱因斯坦宁愿克莱因选择因果律这条路，而不是和玻尔站到一边。

爱因斯坦也不允许分开处理引力场和非引力场。他觉得标准广义相对论只是人为地区分引力和电磁力。目前的方程将前者放在左边，通过几何描述的；而后者，还包括所有以后追加

172



的作用力，条件允许的话都放在右边。实际上，爱因斯坦希望用相似的行为描述的所有的力都放在方程左边，右边什么都没有。类似地，他也更愿意把质量和能量也通过几何结构描述出来，这样的话，就可以把它们都挪到方程左边。

除了物理，数学上也有一些忌讳。爱因斯坦要求助手们不要走捷径，以免数学不够严谨。因为大部分物理学家对他的研究持怀疑态度，所以他容不得丝毫的错误。“你不能犯这样的错。”¹⁹即使他们建议有一些捷径可走，爱因斯坦也会坚持意见。

还有最后一个，最致命的原罪——构建一个带有奇点或者不确定的自由参数的理论。在奇点，物理量会变得无穷大或者无穷小，物理定律由此失效。而自由变量，产生了无止境的可能性，与物理经验相违背。通过一组终极的方程，只可能存在一个被它决定的宇宙。翻译成爱因斯坦的科学“神学”，这些约束意味着，上帝创造这个宇宙的定则必须是完备的（不存在毫无限制的地方，比如奇点）并且唯一的（没有别的解）。

相反，优美的统一场理论应当简单并且深刻，还能得出已知的实验结果，比如光的弯曲和水星的轨道进动。它还要在遵从标准广义相对论的相同的变换下保持不变——维持相似的性质例如等效原理。就像在广义相对论中，一个人如果乘坐没有窗户的宇宙飞船，他是没有办法分辨自己向着地球冲去，还是舒适地待在深邃的太空中的。

最后，按照爱因斯坦的教条，理论所创造出来的这片圣徒们的土地应当可以得到原子光谱和别的量子性质——无需引入概率。这将是在一个纯粹的因果律框架下，重构原子理论的终

极之路。爱因斯坦希望借此达到目标的方法之一是一种被称为 ¹⁷³
超定 (overdetermination) 的数学条件。

一般来讲，解一个问题人们会期望方程数目与未知数的数目相等。例如我们有这样一种情况：Johnny 是 Jenny 年龄的两倍，而 Johnny 比 Jenny 大六岁，这时我们就有两个变量 (两人的年龄)，也有和这两个变量相关的表达式。但是，超定方程不同，它们方程组的数目多于变量数目。普遍地说，这就会严格地限制解——如果最终我们能找到这样一个解的话。爱因斯坦希望这样一种情形可以得出离散的光谱解，得到“类似于玻尔轨道的量子情形”²⁰。

基于爱因斯坦的观点，引入第五个维数给人们很多机会，它说明包括额外场方程的标准广义相对论可能导致超定。可以把这个附加的度规项看成额外的场，令人信服地取代量子波动函数，这样便有可能为量子力学打下完全符合因果律的根基。第五个维数也有可能解释貌似真实的非局域效应，以觉察不到的联系取代之。就像伯格曼写的“因为五维世界的描述就是不完全的，只有寄希望于‘四维’定律的不确定性解决不确定性关系和量子现象，最终由〔经典的〕场理论解释。”²¹

简而言之，在爱因斯坦的职业生涯中，他这个时候拥抱第五个维度的根本原因是他希望能够使广义相对论更加复杂，可以模仿奇怪的量子定则。但是与后者不一样，前者完全基于决定论——通过他方程的五维的拓展，这些量子定则是可以预测的。



变得更加物理

爱因斯坦意识到，第五个维度只有成为物理现实，才能够发挥作用。通过和迈尔合作的经验，他推断纯粹数学上的额外¹⁷⁴维度无法使他一举两得——统一自然力，打击量子理论。就像他在1938年和伯格曼合作的一篇文章中写道的：

如果卡鲁扎的理论是真正的进步，那是因为它引入了第五维空间。我们努力尝试在不牺牲物理空间四维特点的同时，在形式上保留卡鲁扎得到的最重要的结果。显而易见，坚持引入第五个维度得益于我们非凡的物理直觉。但是，考虑并比较所有这些尝试，我们必须承认所有这些努力并没有对目前的情况有所改进。看上去，如果不引入第五个维度，而想用一种简单的方法把卡鲁扎的思想用公式表达出来，是不可能的。

由此，尽管因为朴素的经验，人们并不支持这样做，但我们还是认真考虑第五个维度的合理性。²²

那篇文章，还有爱因斯坦、伯格曼和巴格曼合作的第二篇文章中，第五维进入了方程里面，与其他维度一同被等量齐观。刚开始，没有东西可以把它从时空中分开，但是，这种自由的状态没能持续多久。它的作者们加入了一个周期性的条件，令它卷曲成管状。

这不是克莱因对第五维的描绘吗？当泡利从巴格曼那里听

到这个理论后，向爱因斯坦指出了其中明显的相似。“这毫无疑问是克莱因的老观点，”²³泡利写道。

但是，爱因斯坦坚持自己的观点，他对泡利说，“新的工作和克莱因的仅仅是表面比较像。它是对克莱因观念在基本逻辑上的提升，值得认真检验。”²⁴

这两个理论最大的不同在于克莱因把第五维大小和电荷的量子化联系在一起，而爱因斯坦、伯格曼以及巴格曼没有给出这样的联系。事实上，他们在文章中根本没有提到量子理论，仅仅在相互的信件中简要地提到过。学者冬根（Jeroen van Dongen）发现这样的疏忽很有疑问，可能暗示他们承认对量子理论的模仿以失败告终。²⁵

他们在第二篇文章中确实指出一个重要问题，他们的模型预言了电磁力和引力相互作用应该是相同量级。但是自然界中，电磁力要远大于引力，他们的理论没能体现这一事实。他们把困难归结于“事实上，方程是被唯一确定的……而没有不确定的参数。”²⁶爱因斯坦所认为的幸事——没有自由变量的唯一的解，到头来成为祸根，因为他们无法对方程进行任何修改使之更加接近自然。

那个时候任何一个熟悉物理的人都会注意到他们的方法中还缺少东西。他们的统一场模型仅仅包括两个力，而那时人们已经认识到还有其他基本相互作用力，这些其他相互作用力可以将原子核紧紧束缚在一起，并允许原子衰变，它们的此类性质是当时最紧迫的研究课题之一。我们现在称它们为强相互作用和弱相互作用。这已经被物理界公认，但是爱因斯坦如此脱离大众，并没有当回事。

175



关于原子核的问题

1939年玻尔在普林斯顿进行为期4个月的访问，他和爱因斯坦彼此客套地问候一下，仅此而已。他们没有激烈的争辩，也没有热泪盈眶地为和解拥抱。事实上，他们各自都在深入思考自己的事情，几乎没有任何交流。爱因斯坦被统一的细节纠缠，对玻尔没有什么可说的。那段时间，他做了一个有关自己领域的报告，玻尔出于尊重参加了。报告末尾，爱因斯坦眼神严峻地看着玻尔，强调他希望自己的理论能够重现量子规则，而玻尔保持缄默。²⁷

另一方面，玻尔正在认真地琢磨德国科学家奥托·哈恩（Otto Hahn）最近发现的原子核裂变有何意义。1938年，哈恩用中子轰击铀原子核，有一些中子进入了核内部，并释放出能量。玻尔和他的同事外尔认识到这是一个令人震惊的发现，玻尔希望利用在普林斯顿的这段时间探索这些结果背后的东西。

原子核裂变的发现最令人信服地证实在原子最中心的微小区域存在衰变。就像原子外层是20世纪20年代量子物理学家研究的主要目标，原子内核成为30年代核物理学家的焦点所在。¹⁷⁶通过研究原子核辐射，他们成功地描述了曾经的黑盒子。

1896年亨利·贝克勒尔（Henri Becquerel）发现原子在衰变过程中释放粒子，到现在，科学家已经观察到三种衰变方式。 β 衰变产生电子， α 衰变产生很重的带正电粒子，而 γ 衰变与能量相联系的不可见的电磁场辐射有关。

1930年，泡利将物理原理应用于 β 衰变，他根据反应过程能量的损失总结出在电子产生的过程中，同时也伴随产生一种目前尚未探测到的粒子。他推测，这个看不见的逃脱了的家伙是电中性的。两年后，詹姆斯·查德威克（James Chadwick）果然发现从原子核中发射出中性粒子，不过它的重量比泡利推测的大得多。人们称这种检测到的物质为中子，同时还伴随一种看不见的粒子称为中微子，中微子这个名字是物理学家恩里科·费米（Enrico Fermi）起的。费米将 β 衰变重新解释为中子自发的分裂为质子、电子和中微子的过程。不过，这个过程作为弱相互作用的例子，直到数十年以后人们才充分认识。

随着中子的发现，物理学家努力地研究，他们想解释为何原子核那么紧密地结合。电磁排斥作用会迅速地把正电的质子分开，而中子作为旁观者被孤苦伶仃地留下，难道没有一种未知的力将它们束缚吗？要是这样，除了氢——最轻的元素，没有哪种元素的原子核是稳定的。

为了说明重核的稳定性，物理学家假定存在一种强相互作用力，它仅在微小的区域起作用。这种作用力的强度将随着距离增大急剧减小，以至于超出原子核区域就无法探测到。此外，在当时已知的粒子中，它仅仅作用于质子和中子，对电子（和中微子）无效。

海森伯试图解释强相互作用力的作用方式，他提出一种粒子交换机制。他假设质子和中子彼此之间可以传递电子，就像小孩子玩接球游戏。因为质子和中子都希望将电子拉回来，电子共享的过程将迫使它们紧紧束缚。此外，质子和中子质量相

177



差无几，这种对称性可以让它们相互转变，这使得它们合在一起成为“对子”。一个叫做“同位旋”（也称为“同位的自旋”）的量子数可以区分对子的两个成员。质子的同位旋“向上”，而中子“向下”。然而，海森伯的理论破坏了一个守恒定律，因为虽然质子和中子具有不同的同位旋，但它们都有相同的通常意义的自旋。如果它们分享一个有自旋的电子，这会无中生有地产生额外自旋。

1935年，日本物理学家汤川秀树对海森伯的模型做了重大改进，他用另一种交换粒子代替电子。他提出这种新的粒子质量应当是电子的两百倍，这样才能胜任这一位置。这个交换粒子最后被人们称为介子，对于不同种类的相互作用，介子的带电情况也不同。玻尔最初置疑汤川秀树的观点，指责他把发明粒子当儿戏。

接着，到了1937年，大自然跟物理界开了一个狡猾的玩笑。这一年，好几个试验物理团队在宇宙辐射中都检测到一种粒子，它与汤川秀树交换机制的粒子重量差不多。这一发现使得汤川秀树的理论几乎成为人们普遍认同的强相互作用力的正确解释。很奇怪，那年探测到的粒子被称为 μ 介子，与原子核没有任何关系。当人们逐渐搞清楚这件事，物理学家拉比（I. L. Rabi）惊呼：“这究竟是谁安排的？”²⁸十年后，第一个真正的汤川秀树介子被发现，称为 π 介子，日本物理学家的追寻圆满结束。

任何一位紧跟这些进展的人都会试图将这些不断增加的粒子囊括到某个统一场理论中。即使他们没有这样做，至少他们已经认识到自己的模型远未完成，玻尔、海森伯、外尔以及其他研究

原子核结构的人对此已经了然于胸，但爱因斯坦却毫不知晓。

连伯格曼对量子物理界的态度也比爱因斯坦宽容得多，他密切地注意被爱因斯坦忽略的领域。1938年8月，他在缅因州度假时致信爱因斯坦，表达了他对五维理论没有考虑中子的深深顾虑。²⁹ 爱因斯坦回复道，那个新的发现完全是说得好听而已。从这看来，爱因斯坦更偏好传统之美，而非新奇之物，他的生活就像被高楼环绕的维多利亚时代的村舍。仅仅当原子核理论对于全球政治的意义实在太显著时，他才对原子核理论有所兴趣，其中最著名的是，他警告罗斯福总统纳粹有可能拥有原子弹。但是，这份兴趣没有拓展到重新考虑他的物理概念上去。

178

如果爱因斯坦没有去做这个工作，那么谁能揭示自然统一的意义呢——包括核力、电磁力和引力？奥斯卡·克莱因，曾经像一位坚定的独身主义者离弃了五维理论，但令人惊讶的是，他老去的激情重新迸发。1938年春，在波兰的华沙会议上，克莱因提出了有关高维完全统一各种自然力的建议。

尽管克莱因的理论完全没有成功，但它预示了物理学以后的发展。如果克莱因理论更为广泛地传播，可能会加速粒子相互作用中某些现代物理概念的出现。虽然克莱因的那篇文章发表于来年的会议记录上，但很少有人读过它，战争的新闻将其掩盖。黄疸曾让克莱因在量子理论的全盛时期只能作壁上观，这时，克莱因又一美好的目标被不合时宜的战争断送。随着希特勒的侵略导致第二次世界大战爆发，欧洲进入了苦涩的年代，统一缥缈如梦。

美丽新世界^①

第9章 ——在灾祸连绵的年代追寻统一

面对悲剧，存在两种截然不同的姿态。要么是屈服，变得悲观沮丧——有一两个人〔物理学家〕是这样的。要么振作起来投入工作，他们两线作战，一面是他们的科学，在未被战争抹平的地方，按照美丽新世界的方式工作，对于他们中的许多人，物理是生命的一部分，有一个人甚至就是这样说的；另一面，他们在政治上非常活跃，试图告诉人们正在欧洲上演的悲喜剧。

——杰拉尔德·霍尔顿，科学史家

旧欧洲的暮色

179

斯德哥尔摩虽处高纬度，气候却分外宜人。受墨西哥暖流

① 源自赫胥黎的同名小说，意指一种剧烈变更的人类生存方式的幻想或现实，尤指科技革新对社会、政治和经济结构带来强烈的负面影响。

的一个分支影响，它没有北极地区那样恶劣的天气。尽管位于拉布拉多（Labrador）北部，但斯德哥尔摩的冬日更为舒适，它的港口一年四季迎来送往的船只不断。

30年代，奥斯卡·克莱因极为幸福地泊于自己温暖而舒适的港湾里，他和妻子骄傲地养育庞大的家庭。他惊奇于孩子们多样的才华，从人文学科到生物学。最后，有的一生追求艺术，有的以授业解惑为职业，有的献身新闻事业，还有的从事别的专业，就是没有投身于物理的。尽管克莱因热切地希望某个孩子对他自己的领域感兴趣，不过，他还是非常开明地接受孩子们自己选择的道路。¹

180

虽然他对此很满足，但瑞典的奥德修斯不可能永远身处内陆。第五维，如塞壬^①（Siren）的歌声，如此甜美动人。即使他试图忘却，可他无法从脑海中抹去这旋律。他需要再次起航。

1938年，克莱因跨越波罗的海来到欧洲的中心。尽管沐浴的水温和瑞典没有区别，但空气中弥漫着厚重的冰冷和恐惧。不是地理位置的改变，而是政治造成了这种气候上的转变，希特勒令人厌恶的政策把国际合作打入冰河时代，欧洲的物理界也备受其害。

华沙“物理学新理论”会议的参与状况折射出一个割裂的世界。会议由“国际物理组织”和“波兰知识合作委员会”共同发起。后者由国家联盟促成，致力于科学家之间的和平研

① 塞壬：一群女海妖之一，用她们美妙的歌声诱惑船只上的海员，从而使船只在岛屿周围触礁沉没。



讨。随着希特勒对波兰的图谋的实施——一年后他便野蛮地侵占了这个国家——这个会议与他极端种族主义的观点相背，由此，海森伯等德国物理学家被禁止参加。类似的原因，也没有意大利的物理学家参加。不过，来自其他国家的很多杰出科学家还是成功地参加了这个会议，包括玻尔、爱丁顿、伽莫夫、克拉默斯、罗森菲尔德（Léon Rosenfeld）和维格纳（Eugene Wigner）。

克莱因的绝技

带着一点炫耀的意思，克莱因报告了他最新的五维工作成果“关于带电场的理论”。它给出了一个动人的方法，将引力、电磁力和原子核力囊括进以狄拉克成功的电子模型为基础的统场方法中。这个理论模型不像爱因斯坦、伯格曼和巴格曼提出的理论，它考虑了汤川秀树的发现以及最近粒子物理中的革新。具体地说，它考虑了质子和中子通过交换介子（meson）的转换（克莱因更喜欢用早期的一个词称呼介子，mesotron），¹⁸¹这反映了质子和中子之间存在基本的对称性，就好像它们几乎是一对。

数学上，克莱因用两行的矩阵描述了他的模型。一行对应零电荷，表示中子场；另外一行对应正电荷，表示质子场。如汤川秀树的理论，这些场形成同位伴粒子。通过精巧的设计，伴粒子中的每个成员不同的电荷皆可由它们数学上对第五维的依赖性得出。另外一个矩阵表示介子，允许从一个场到另外一个场的变换，这些在一个抽象域的转动被称为同位空间。一个

平行的结构描述了电子和中子之间相似的变换。克莱因的理论以同一机制刻画了强力和弱力。我们现在知道，它们之间的交换粒子不同，应该分开处理。

我们可以用指南针的方向解释克莱因的模型。在同空间，质子场代表“北”而中子场代表“南”。一般说来，原子核（质子和中子）由这两个场合成，可以用它们代表的方向描述，例如东北。介子使原子核从一个方向转变到另外一个方向，改变它们态的混合情况。用现代物理的观点可以这样陈述，原子核遵从规范对称性，而交换粒子就起了规范场的作用。这和外尔最初描述的规范模型不同，它在一个抽象域里操作而不是真实的时空。

作为会议活动的一部分，克莱因的理论用法文发表出来。但是直到十多年后，它才被物理学家（克莱因未来的女婿）斯坦利·狄塞（Stanley Deser）重新挖掘出来，斯坦利这样描述偶得这篇文章的过程：

我当时刚刚从哈佛大学毕业，我们都想从各个途径不断地汲取物理知识。记得有一天，我徘徊于物理图书馆四楼的书库中，发现了这篇尘封已久的文章。我是从欧洲来到美国的，因此刚好熟悉法文。看着这册积满灰尘的书，想“这些家伙会是谁呢？”我并不熟悉物理学，但是当我看到克莱因的文章后，我想“噢，这个想法听起来相当不错。我想知道发生什么了，他现在在哪里？这些物理理论现在如何了？”²

182



斯坦利不久把这篇文章给他的导师朱利安·施温格 (Julian Schwinger) 看，接着就演变成传说的一部分。物理学家都惊叹于克莱因这个理论预兆了现代物理的发展，同时也会注意到其中的一个重大缺陷。成功的原子核相互作用的规范理论是由杨振宁和罗伯特·米尔斯 (Robert Mills) 于 1954 年发展起来的 (他们并不了解克莱因的工作)，理论是非阿贝尔的，这就意味着变换顺序不同将导致结果的巨大差异。先旋转 B 再旋转 A 与顺序旋转 A 和 B 会产生不同的后果。规范变换的一个特殊的群——SU (2) 群，就体现了这种性质。数字上，一个群是由一组元素和一定规则下的操作组成。对 SU (2) 群，这些元素是具有独特性质的二乘二的矩阵。对于这个特别的群，它们的对称性 (即，在某些操作下，性质不变) 表明，规范粒子应该是没有质量的。

一个表示 SU (2) 群的方法是沿着球面旋转。就像我们在 Marius 和 Daruis 的例子中说明的，他们分别沿着不同的路径到北极 (如第四章中描述的)，纬度和经度的顺序至关重要。先东后北和先北后东的结果截然不同。这就是为什么数学家把 SU (2) 群归类成非阿贝尔群的原因。

克莱因的模型完全没有涉及 SU (2)。它仅仅是基于对 U (1) 群——电磁场规范变换中更简单的一个群的延伸，为兼容原子核力而加入。U (1) 可以用沿着一个平面环的圆周旋转表示。对这样的变换，操作顺序没有任何影响，比如说，沿着环的边缘先顺时针旋转 45 度，接着逆时针旋转 30 度和逆向操作的结果一模一样。

克莱因的理论中，规范粒子，即介子有质量，这与以后的

杨-米尔斯规范场论 (Yang-Mills) 形成鲜明对比。因此他几乎开创了现代规范理论，虽不完整。即使如此，50 年代的物理学家依然吃惊，克莱因的理论那么早便出现了，他究竟是如何抓住物理学的脉络的呢？他的直觉在某种程度上，领先他的时代 15 年之多，没有实验证据也缺少系统的理论来检验他大胆的论断。在阿卜杜勒·萨拉姆的诺贝尔奖的获奖演说中，他称克莱因 1938 年提出的理论为“一项货真价实的绝技”。³ 183

反而克莱因的同代人，似乎完全忽视了他的工作。在那次会议上，只有一个物理学家慕勒 (Christian Moller) 问了他一个问题，他想知道这个理论是否可以将中子和带电介子都考虑进去。众目睽睽之下，克莱因聪明地修改了他的理论以符合慕勒的建议。⁴ 其余的观众则完全保持沉默，他们不知道自己正在见证非常超前的粒子物理理论。

不久，克莱因致信玻尔，询问他的理论能否在美国一流物理杂志《物理评论》上发表，玻尔甚至都没有回复他。人们还笼罩在希特勒令人恐惧的谋划和日益严重的逃亡危机中，每个人都有许许多多更紧迫的事情亟待处理，谁还有时间把心思放在原子核裂变的发现上。

危机一开始，克莱因就努力帮助科学家从纳粹德国逃出去。1933 年，他为沃尔特·戈登提供资助，让他逃离汉堡在斯德哥尔摩安顿下来。5 年后，他又支持莉泽·迈特纳 (Lise Meitner) —— 奥托·哈恩 (Otto hahn) 以前的助手，同样地逃到瑞典，迈特纳后来向玻尔和别的核物理学家透漏了哈恩原子核裂变的发现。接着，第二次世界大战一爆发，克莱因和妻子就成了瑞典难民的核心。这是一个危险的任务，但是克莱因



觉得他有道义尽自己的责任，毫无疑问这归功于他父亲人道主义精神的潜移默化。克莱因的女儿爱斯贝斯（Elsbeth）记得不断地有丹麦的难民在他们家住下，他们中的大部分不是物理学家，和他们家也没有任何关系。⁵ 值得一提的是，在尼尔·玻尔惊险地逃避纳粹期间，克莱因曾帮助他逃到瑞典。

格廷根大清洗

在克莱因帮助移民找到避难所期间，卡鲁扎正在帮助一座失去这些人的德国大学恢复运行。犹太籍和其他受迫害教授的大批离去让经验丰富的教员奇缺，大学急得火烧眉毛，希望维持它们的各项研究，在一定程度上，保持以往的声望。

¹⁸⁴ 卡鲁扎填补了格廷根 1933 年清洗造成的一个职位空缺。那年的 4 月 7 日，纳粹政府颁布法令，批准解雇所有的非雅利安教授，除非他们曾在第一次世界大战服役过。（稍后，即便是服役过的教员也失去了工作。）不久，这个国家成百上千的犹太籍教授发现他们被强迫“离开”，包括沃尔特·戈登、马克斯·伯格曼等许多人。即使物理系的领袖们也被解职，包括马克斯·玻恩，他长期担任系主任。玻尔的同事，诺贝尔奖得主詹姆斯·夫兰克（James Franck）以辞职抗议，但是当局不以为然。

对于星光耀眼的格廷根数学系，后果格外可怕。一个新的数学学院最近建成——这个挂着崭新铭牌的建筑物超越了老城墙——由受人尊敬的数学家理查德·柯朗（Richard Courant）领导。柯朗为筹集新中心的资金费尽周折，但是，反闪米特人

法令强迫他和众多同事一起离开；埃米·诺特（Emmy Noether），德国首批女数学家之一，历尽千辛万苦才获得教授身份，也不得不离去。她至今依然被人们铭记，因为她发现了与守恒量相关的对称性，这一发现铺平了现代规范理论的大道。而规范理论的开创者赫尔曼·外尔，不久也离开了格廷根，外尔不是犹太人，但他的妻子是。因为校园中大规模反闪米特人的学生运动，他担心她受到不断的骚扰，因此，他辞职前往普林斯顿，加入爱因斯坦所在的普林斯顿高等研究院。

人们抗议这种解雇，给政府发出请愿书，许多杰出的德国人署上自己的名字，包括希尔伯特和海森伯。这些衷心的恳求石沉大海。大约那个时候，爱因斯坦致信巴伐利亚^①科学院主席“就我所知，一个不容忽视的德国学者群，以及经过专业训练的学生群在德国被剥夺了一切工作机会，也被剥夺了生存权。此时德国学术性团体却袖手旁观，不闻不问。”⁶

此后，希尔伯特被邀请参加一个晚宴，出席人士包括著名的纳粹教育部长本哈德·拉斯特（Bernhard Rust）。当拉斯特询问希尔伯特格廷根犹太人的驱逐对格廷根的数学项目有何影响时，希尔伯特悲痛地回答：“格廷根已经没有数学了。”⁷ 185

不过，还是需要有人来经营这一片废墟。柯朗已在纽约的路上，在那里成功开始海外学术生涯，格廷根的数学系需要一位新的主任。外尔曾经短暂地担任过这一职务，当他也决定去美国后，数学家哈瑟（Helmut Hasse）不情愿地接任了。

在拉斯特的领导下，纳粹制订了一个项目，希望“德国

① 德国一个州。



化”科学和数学，剔除所谓的“犹太影响”。物理上，任何与爱因斯坦理论甚至量子力学相关的东西都开始被官方禁止。奇格拜（Paul Ziegenbein），这位来自德国北部城市基尔的数学家也在卡鲁扎那里学习过，被任命协助哈瑟实施“德国化”的管理。⁸ 作为纳粹忠实的成员，纳粹委托他监视哈瑟的一举一动。

尽管哈瑟接替了柯朗的管理职责，他仍然希望有人能够填补柯朗研究和教学的空缺，因此 1935 年数学系开始寻找合适的候选人。奇格拜和哈瑟对卡鲁扎的工作很熟悉，于是卡鲁扎在名单中赫然出现。最终，咨询了另外一些候选人后，他们给了卡鲁扎这个位置。

就像传记作者伍戚（Daniela Wunsch）指出的，选择卡鲁扎在很多方面都令人惊讶。首先，他的领域与柯朗差别很大，柯朗是一位应用数学家，而卡鲁扎的名字和五维理论以及相对论的推广联系在一起。在同意接受此职位之前，卡鲁扎明确坚持他不是“第二个柯朗”。⁹

第二，卡鲁扎从来都不是纳粹党或国家社会组织成员，也没有任何兴趣加入其中。他在自由的传统中成长，觉得种族仇恨极其愚蠢，他认识柯朗和其他被开除的科学家，为他们的解聘而愤怒。不过，卡鲁扎的原则立场与这个职位并不排斥。

186

在那些黑暗的日子里，卡鲁扎很希望在国外找个工作。考虑到国外职位紧缺，以及自己没有太多研究成果，他觉得无望得到如此职位。因此，带着些许惊恐不安，他接受了格廷根的邀请。

克莱因的蚕茧

当卡鲁扎到格廷根的时候，空气中的政治气氛淡了些。两年多的极端“德国化”令传统学术界疲惫不堪，因此卡鲁扎的任命与哈瑟的工作目标相同，要把数学系转到更主流的方向。

这并不意味着数学系和大学有任何的自由，国家依然由纳粹统治。像这个时代别的管理人员一样，哈瑟费尽心思使学校和当权政府保持良好的关系。如果因为某些重大事情，出于战略上的需要他甚至会申请成为纳粹成员。但是，就数学自身来说，哈瑟成功地让政治很大程度上远离了大学。

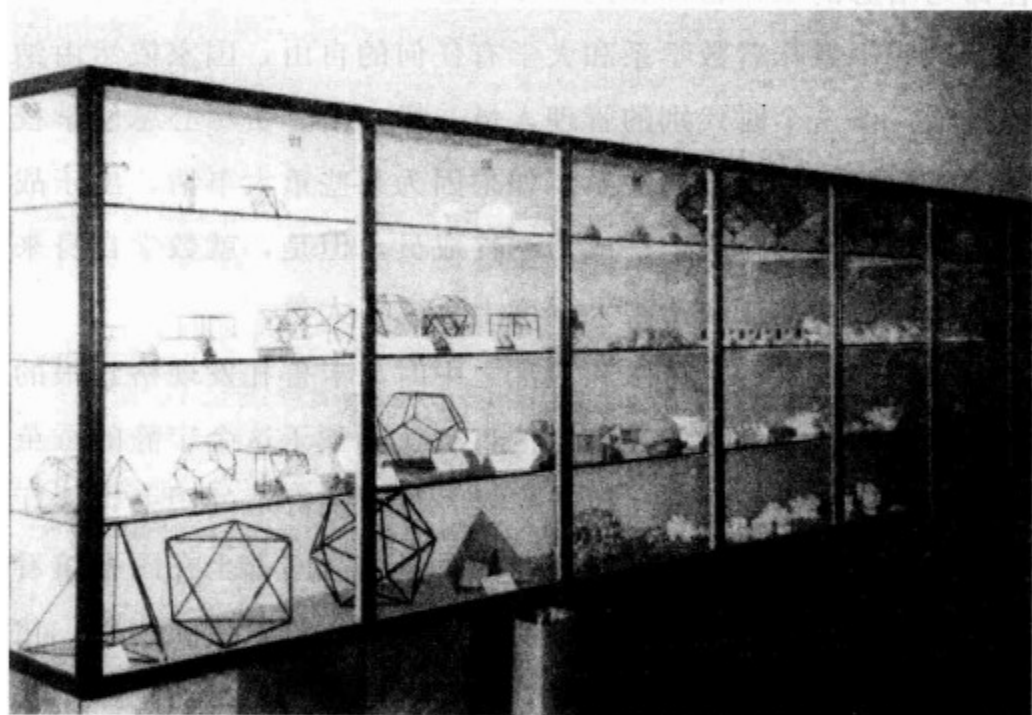
当德国陷入一片愚昧和混乱之中时，卡鲁扎发现格廷根的数学学院像一个硕大的蚕茧，他自己就隐藏于这个宁静的蚕茧里面。学校提供的办公室位于二楼，从学院舒适的图书馆大厅朝南走便到。他的女儿回忆道，他大量的时间都坐在图书馆看书，他不仅仅关注数学方面的期刊，同时还紧紧追随物理、化学、生物和心理学的最新发现。他甚至好奇于超自然现象——当时盛行的话题。多萝西娅熟悉他父亲卡鲁扎的日程，因为她在毗邻的物理学院工作，经常过来看他。¹⁰

卡鲁扎那个时候的研究分成两个部分。第一个是他正式的、已发表的工作，包括一本与物理学家乔治·尤奥斯（Georg Joos）合著的影响深远的教科书《实用高等数学》¹¹；第二类是他沉思的一些东西，空想的非正式的计划，到目前为止，它们占据了他大块的时间。

日复一日，当卡鲁扎走过数学学院的大厅，他都会好奇地



从几何模型的陈列柜经过。陈列柜中的许多模型由数学家维克多·施莱格尔（Victor Schlegel）设计，他像斯特林厄姆一样，创造了很多超立方体和别的高维物体在现实世界的投影模型。菲利克斯·克莱因认为它们是非常有用的说明工具，便把它们弄到系里，它们可以用来展示出高维空间奇妙的性质。



陈列于格廷根数学学院大厅的各种几何形状的玻璃，其中包括超立方体等高维物体的投影。毫无疑问，这些东西吸引了卡鲁扎的兴趣，学院建立若干年后，卡鲁扎成了这里的教授。

在科学上卡鲁扎与外界隔绝，于是他迷恋上如何通过形象的类比来验证他的五维理论。他按照柏拉图洞穴寓言的样子，希望说明我们感知的世界仅仅是五维真实世界的影子。他设计了一个特殊的几何装置，与陈列柜中的类似，他可以拿着它，

依靠光线和操控，证明真实世界的组成与超空间的投影特点类似。¹²考虑到在这个方面的思考有太多揣测成分，他从来没想过发表。

战争一爆发，更多紧要的事情需要卡鲁扎处理。哈瑟开始在柏林的政府机关任职，留下卡鲁扎——格廷根仅存的两个资深的数学家之一。卡鲁扎被任命为系主任以后，开始烦闷地处理大学公务。不过，在某种程度上，他还是保持了自己观点的独立性，他竭力反对官方政策，拒绝在信件上写上敬语“希特勒万岁”便是其中的一个缩影¹³。当纳粹被最终击败，他与纳粹保持距离的行为帮他保住了在格廷根的位置。

188

战时的物理学

战争的前些年，希特勒的统治范围在欧洲大陆日益膨胀，流亡者也更加大声地敲响美国的大门，希望从死亡的危险中求得庇护。对于那些进去了的人，许多都希望找到一个与他们离开之前相媲美的工作。他们与那些在战前的移民风潮中过来的人竞争日渐稀缺的工作机会。

来自欧洲名誉卓著的大学的学者希望能立刻在哈佛或者普林斯顿找到工作，但是他们最终只有失望地哀叹。因为职位匮乏，他们不得不在伟大美国的穷乡僻壤，一个以前从来没有听说过的地方工作。各式各样的移民代理机构，帮助他们在一些次等学院找到与自己能力对应的工作。杰拉耳德·霍尔顿叙述道：



一个典型的故事是关于维克多·韦斯科夫 (Victor Weisskopf) 的。他和丹麦妻子从欧洲移民过来，是一位非常优秀的物理学家，他希望在一个物理会议——一个招聘会上，找到一份工作。回到家后，他说“埃伦，我搞到工作了。”妻子问道“哪里？”“我真的不记得了，我想那个大学是以‘R’开头的。”

这让人丧失信心，他们之中的一些人异常艰难地工作。但是大多数人并非如此，大部分人的地位得以提升，麻省理工学院非常迅速地把维克多·韦斯科夫拉了过去，而哈佛要了菲利普·弗兰克。¹⁴

这种氛围下，爱因斯坦分外努力地为他的助手在美国主要的大学争取位置。伯格曼 1940 年便工作期满，于是爱因斯坦¹⁸⁹一封接一封向许多重要岗位寄介绍信。通过理查德·托尔曼，爱因斯坦得知加州理工学院有空缺，于是急急忙忙地完成了一封满纸溢美之词的推荐信：“我有一个和我共事 4 年的助手，彼得·G·伯格曼博士。我们天天在一起工作，由此我对他的判断非常可靠。他具有扎实的数学知识，清晰独立的思想，并善于用公式表述。他给予了我极有价值的帮助，我非常敬重他，不仅因为他的工作，也因为他正直的性格。”¹⁵

因为大量的申请飞往加州理工学院等大学的岗位，伯格曼不得不暂时找一个地位低一些的工作，先安顿下来。1941 年，他和妻子玛戈特移居加州北部，开始在黑山学院工作。黑山学院坐落于一个美丽的地方，是一所试验性质的学院。在没有找到另一份工作之前，它为伯格曼提供了宽松的环境，可以独立

于他著名的导师开始自己的工作。他工作于物理系，同时玛戈特在那里教化学。他们的儿子恩斯特（Ernest）叙述道，“黑山是一个‘体验蓬勃朝气’的地方，他们晚年愉快地回忆这里的生活。”¹⁶

在这个田园般的地方，伯格曼完成了一本出色的新教科书《相对论导论》。当五维理论被许多其他研究方向取代的时候，这本书对五维理论的传播至关重要。爱因斯坦很友好地为其撰写了前言。它对爱因斯坦的工作给予了基础但是全面的概述，“很长一段时间，这是每位研究广义相对论的人必读书目。”¹⁷物理学家温伯格证实道。

这本书分为三部分：狭义相对论、广义相对论和统一场论。第三部分的许多内容都是描述卡鲁扎的方法，以及评述爱因斯坦对其五维理论模型的扩展的。伯格曼把高维的统一方法与相对论中其他问题列到一起，强调它在相对论中的重要性，这就像一部流行电影与一部晦涩的纪录片连着播放，任何希望抓住要点的人都必须博览各种阅读材料。从此开始的整整一代人，几乎每一个学习相对论的学生都或多或少熟悉卡鲁扎-克莱因理论。

1942年，伯格曼在宾夕法尼亚（Pennsylvania）的里海大学找到了一个研究方向性更强的职位，而玛戈特在布鲁克林（Brooklyn）的工艺专科学校做了一名物理化学专家，专攻X光射线的晶体成像。为了适应各自的工作需要，他们在曼哈顿租了一间公寓。到了周末，他们都回到家，享受在“大苹果”里生活的乐趣，这成了他们多年不变的生活方式。

伯格曼为大学生教授物理引论，但是他时常因为浓重的口



音和习惯性的授课风格被别人取笑。克莱斯勒汽车公司的CEO李·艾科卡（Lee Iacocca）可能是伯格曼在里海最出名的学生，他在自传中回忆伯格曼的课程：

大一的时候，我的物理课程几乎都挂掉了。我们有一个教授叫做伯格曼，他从维也纳移民过来，口音特别重，我几乎听不懂他说什么东西……就那样，尽管他的课我学得不好，但是我成了他的好朋友。我们在校园里蹓跶，而他就跟我讲物理学的最新进展。

伯格曼有些神秘之处。每周五他都会突然下课，匆忙离去，然后下周一才回来。直到很多年后，我才得知他的秘密。考虑到他的兴趣，其实我似乎已经猜到了。他曾经每个周末都去纽约参加曼哈顿项目。也就是说，如果伯格曼不在里海教书，那他就在从事原子弹的研究。¹⁸

欧内斯特·伯格曼发现他的描述有些牵强。“我读了那本自传并且问过我父亲。我父亲并非维也纳人。当他有时间的时候，他确实是去纽约，因为我的母亲在那里期盼着我的降临（我是1942年11月出生的）。因此，我就是所谓的‘曼哈顿项目’。我的父亲不记得有叫艾科卡的人。”¹⁹

伯格曼在里海大学，还有一则故事。至少在一定程度上是真实的：“伯格曼在教学楼第四层授课，他坐在一个敞开着的窗户的宽沿上，轻轻地摇摆。突然，他摆幅过大，从众人眼前猛然消失。当坐在教室里的学生一个个目瞪口呆，陷入恐惧之时，一只手伸了上来，手上还拿着一段粉笔。伯格曼慢慢地、

慢慢地爬了回来，接着镇定自若地继续讲课。从这个故事看来，建筑工人应该靠着窗户竖起脚手架，以便提供宽敞的平台。”²⁰ 191

1944年伯格曼离开里海大学，做了一名声纳分析师，为二战效力。这是他第一份应用工作，虽然与相对论相距甚远，不过他却做得得心应手。接着，1947年，他成为锡拉库扎（Syracuse）大学的教员，并在那里一直呆了35年，建立了这个国家引力研究方面数一数二的院系。

与此同时，瓦亚·巴格曼的求职经历比他以前的同事直截了当得多。当他作为爱因斯坦的助手期满，就开始在普林斯顿大学教书，他也与冯·诺伊曼从事过有关毒气动力学的军事方面的研究，接着，在匹兹堡（Pittsburgh）大学短暂地工作一段时间后，1948年普林斯顿大学授予他终身教授职位。

巴格曼在普林斯顿教了很多年书，成了一位颇有声誉的资深学者和教师。他的诸如数学物理方面的课程“因清晰优美而名声在外”。²¹ 物理学家肯·福特（Ken Ford）曾经上过他的课，他回忆道，“巴格曼积极备课，授课条理清晰。从黑板的左边到右边，都被他写满了公式。”²²

巴格曼的妻子桑嘉（Sonja）成了一位受人尊重的编辑和爱因斯坦著作的译者。在收集爱因斯坦随笔及其别的作品方面，她起了至关重要的作用。她和巴格曼审阅了爱因斯坦作品的英文翻译，将其编撰成集起名为《思想与意见》。

泡利的梦想

泡利曾经向爱因斯坦暗示巴格曼更多的是一位数学家而不



是物理学家；他曾经还评论帕斯库尔·约当“仅仅是一个形式主义者”，言下之意与（他这位）天才的物理学家相比，约当处于“生命的低级阶段”，²³他告诉奥斯卡·克莱因他真正的天才是教书而不是原创性的物理研究，他也尖锐地批评爱因斯坦的优柔寡断。如此谁还可能达到泡利的期望，快活地过日子？

正如斯坦利（Stanley）回忆的，“他极为粗暴和自满。他¹⁹²希望得到比上帝还要多的荣耀。我有一封来自泡利的信，那个时候我在苏黎世，想过来拜访他。他回复我说，很不幸他不能签发瑞士的护照，所以他不能阻止我过去。”²⁴

作为一名神童，泡利孩提时代就偷偷地把相对论的文章带到高中教室，上课无聊了就看看。成长过程中，他对别人和自我的期望都极高，这样的环境让他形成自满挑剔的性格。因为他实在太聪明了，他的同事对此一般都很宽容，“我和他的谈话确实很少，”斯坦利说，“他太聪明了。”²⁵

泡利和他的母亲格外亲近，但是随着她 1927 年的自杀，泡利彻底崩溃。很快，泡利结婚了，仅仅一年内就糟糕地离婚，接着他的酗酒问题又让他去寻求精神治疗。

那时，精神分析运动分裂为两种迥然不同的思想流派。主流由西格蒙德·弗洛伊德（Sigmund Freud）领导，研究对象是个体的无意识；另一分支，由卡尔·荣格（Carl Jung）领军，强调集体无意识的力量。与爱因斯坦对弗洛伊德的爱好相反，泡利坚定地相信荣格的模型，他希望它能够解释他的行为并且在需要的时候可以引导他。从 30 年代早期一直到 50 年代末泡利逝世，他都与荣格保持书信来往，并接受荣格一位助手的精神分析。

作为精神分析过程的一部分，泡利记录下超过一千个梦境，并将他的描述寄给荣格。许多梦都与数字三和四联系在一起。荣格分析并发表其中的一部分，用以支持自己的理论。

泡利最初非常谨慎地向人提及他对荣格心理学的爱好。只是到了他人生后期，他公开了这件事，并宣称科学的未来将是物理和心理现象的合并。

荣格的自我原型来自东方哲学，是对立的统一。泡利的言行便是这一原理的例证，尽管他没有像爱因斯坦那样完全改变方向，但是泡利的自我矛盾让他的同事困惑。

统一场理论是他的态度最摇摆不定的领域之一。面对统一场理论时，他主张对它的研究是徒劳无功的，他这样嘲笑其他物理学家寻求一个包容万象的理论：“人类不应该将上帝撕碎的东西拼起来。”²⁶

193

泡利的第一篇文章便是对外尔理论严厉的批评。类似的，他也看不起爱丁顿的统一方法。虽然他对克莱因原创性的五维工作好奇，但他劝克莱因放弃。他污辱爱因斯坦的距离平行性方法为“糟糕的垃圾”。难怪埃伦费斯特安排泡利扮演“上帝之鞭”。²⁷

但是，泡利奇怪地转变了态度。30年代中期，他花费了许多时间研究自己的统一方法：在维布伦和霍夫曼的投影相对论中加入量子理论观点，他告之克莱因他的这些想法，并鼓励瑞典科学家也回到这一课题。泡利的兴趣毫无疑问也刺激爱因斯坦和伯格曼、巴格曼的研究。泡利后来又后悔走了这么多弯路，他对物理学家弗里曼·戴森（Freeman Dyson）说：“如果我没有花那么多时间去弄明白五维的相对论（卡鲁扎-克莱



因理论以及类似方法)，说不定已经独自发现了量子力学。”²⁸

泡利具有奥地利国籍，而他父亲的祖先是犹太人。因此他害怕被中立的瑞士驱逐到纳粹德国，于是泡利在战乱年代安全地待在普林斯顿（除了访问密歇根大学和普渡大学）。他在那里和爱因斯坦的合作虽然短暂但是成果丰硕，他们工作的结果让爱因斯坦决心放弃他对可能存在的五维模型的研究。

爱因斯坦的退隐

爱因斯坦和泡利 40 年代初在普林斯顿高等研究院共同工作过，这个时候的研究院较之老范楼更加绿意盎然，也宽敞得多。1939 年，研究院终于搬到了自己的地方，它坐落于普林斯顿村外面的古昔农场。研究院被若干亩小林子、香气迷人的园子以及平整过的牧地环绕。自从爱因斯坦离开卡普斯后，他时刻想念着那里与世隔绝的、如诗如画的田园美景。现在爱因斯坦的办公室，也是他的家，给予了他宁静的思想所必需的私人空间。

研究院的主楼富德楼（Fuld hall）是具有殖民风格的典雅建筑。范楼的设计非常紧凑，没有一个办公室与研究室隔得很远，但是富德楼却分外宽敞。就像一只展翅的老鹰，从主楼的钟塔处展开它宽阔的双翅。建筑物的前方，一条蜿蜒的道路连接着研究院与普林斯顿大学——路程比原来更远了。

经过那些年的通信（除去先前泡利来研究院访问的一年），爱因斯坦和泡利非常高兴彼此志趣相投。尽管泡利批评爱因斯坦后期的工作，他还是敬重爱因斯坦年轻时的成就，并且是广

义相对论重要性的坚定支持者。为了感谢爱因斯坦的关心，²⁹ 他开始关注广义相对论与量子概念调和的一些困难。此外，在某些方面，他把自己视为爱因斯坦第二，并且把那段时间视为从爱因斯坦左右手到继承人的转变过程。泡利被爱因斯坦提名诺贝尔奖并于1945年摘取此桂冠，这段时间他们之间的友谊最为亲密。爱因斯坦发表的演讲让他备感荣幸，他评论那个演讲“就像一个国王退位，任命……他的继承者。”³⁰

爱因斯坦和泡利仅仅共同写过一篇文章——他们合力再一次尝试实现卡鲁扎的想法。文章确认了五维观点的美妙，同时强调要取得成功需要面对的技术问题。“当人们试图找到引力



富德楼，高等研究院的主楼。爱因斯坦研究自然统一理论的办公室便在其中。最近，它成为杰出的弦理论家的研究中心，包括 Juan Maldacena、Edward Witten、Nathan Seiberg 等人在这工作。



和电磁场的统一场理论，”他们写道，“他就会情不自禁地想到卡鲁扎的五维理论中存在部分真理，虽然它的基础并不能让人满意。”³¹

在一个方法中，爱因斯坦和泡利对第五维的大小不做任何限制，把它与其他维度等量齐观。他们甚至没有将其卷曲成管状，而是假设，这些场就像意大利面条一样，可以延伸展成五维时空。只看到“意大利面条”的两端，我们会认为时空是四维的，即使它实际上是五维的。他们的方法在一定程度上预示了现代膜世界理论。

爱因斯坦和泡利尝试在这个模型中找到非奇点（非无穷大）的稳定解，以此对应人们熟知的粒子。当这些条件加入到广义相对论后，结果并不让人满意。唯一的解为零质量和零电荷情形，排除了电子和质子存在的可能性。这是一个比较奇怪的宇宙，但肯定不是我们的宇宙。他们将这篇文章看成消极的发现——科学在这条路上走进死胡同，并发表了它。

爱因斯坦相信自己无法走得更远，以后从来没有回到五维理论的领域。他所迷恋并寄希望能够神奇有效的额外维度成了另一个里程碑。从此，他的统一理论研究的框架从来没有超出过经典时空。与泡利合作的许多年后，爱因斯坦在一篇自传体随笔中，提到他的这个决定：“我放弃了一个直接的或者含蓄的维度的增加，这是由卡鲁扎加入投影变量独创出来的。至今，这个理论依然有追随者。但我将我们自己的研究限制在四维的空间中。”³²

战后，泡利回到苏黎世，在瑞士联邦技术大学继任他的教授职位。工作氛围不久把他带到了另一个统一场模型中，这次

的模型由他的朋友帕斯库尔·约当建立。

良知和宇宙

在纳粹的统治下，德国科学界各自为政。良知和抱负不同，人们踏上的科学道路也不尽相同；从反对当前的政体到拥护它。很自然，前一种选择最危险，可能会被捕、驱逐甚至迫害。相反，走上后面一条道路，人们可以依赖政府快活无比，但是一旦出了国门，其他人的态度的陡然变化会让他们无法接受——诸如斯塔克（Johannes Stark）和勒纳德（Philipp Lenard）等狂热的反犹分子便朝此奔去。而第三条路，“中间道路”也有人选择，比如卡鲁扎等许多学者，他们远离社会，全身心投入研究和教学，尽一切可能与政治绝缘。

海森伯与众不同，他一直与国外保持紧密联系直到战争爆发，他希望希特勒炽热的光芒能够迅速燃尽。斯塔克等人借这些国际联系攻击他。但是，战争期间他充满争议地为纳粹的原子武器项目工作，虽然他后来发表声明说他曾经试图停止下来，不过玻尔最近公开的信件让人们对他的声明产生疑问。战后，海森伯的许多同事对他非常气愤，约翰·惠勒回忆道，当他陪同海森伯到普林斯顿的时候，许多教授包括巴格曼拒绝与他握手，那时巴格曼完全是背朝着他，惠勒想起来历历在目。³³

如果海森伯的行为只是让人们不甚明白，那约当的行为完全难以捉摸。在纳粹掌权之前，他就在极右派期刊上发表极端民族主义的观点，为了不与主流的朋友们疏远，他在文章中使



用了笔名多密尔。接着，在1933年11月，当希特勒的军团在柏林和其他德国城市行军的时候，约当加入了响声雷动的迎送队伍。作为克莱因、泡利、玻恩、玻尔等许多犹太或者半犹太科学家的朋友，他现在正“身穿统一的棕色制服，脚踏长筒靴，佩戴万十字臂章。”³⁴

197 约当一边为纳粹的疯狂摇旗呐喊，一边依旧在罗斯托克（Rostock）大学做一位认真严肃的物理学教授。他在那里选择的研究课题是量子场论和相对论，而这些正是那些意欲“净化”德国物理的人（比如斯塔克）所声讨的东西。但是他与绝大多数同胞不一样，他不依不饶地提及爱因斯坦和他工作上的贡献，并激烈地反对把民族主义的战火烧到科学领域。

后一立场让泡利能够一直和他做朋友，泡利为他战后平反昭雪起了举足轻重的作用。泡利没有谴责他，很少拿他战时的文章嘲笑他。“约当先生，你怎么会写出那种东西？”有一次泡利问道，约当回答：“泡利先生，你怎么会去看那种东西？”³⁵

1945年，当盟军逼近柏林，约当抓紧那段时间，从一个英国人保罗·狄拉克的工作出发，提出了一个新的理论。而这段日子他繁忙地工作于火箭中心，为纳粹德国空军进行气象方面的计算。然后，盟军占领德国期间，约当移居格廷根，他在那里暂时寄居于格廷根大学的数学系，把他的理论向前推进。

198 约当的方法也就是人们熟知的约当-布兰斯-迪克（Jordan-Brans-Dicke）模型（后两个物理学家以后重新发现了他的方法）的标量张量理论。它对广义相对论进行修正，使引力的大小随着时间减少。它细化了1937年狄拉克的观点——电磁

力和引力数量级的差异是因为后者不断减弱引起的。知道了大概样子，狄拉克开始计算是否牛顿的引力常数“G”随着宇宙的年龄成比例减小，这将很好地解释为什么两个电子之间产生的库仑斥力比万有引力大很多很多。除了纯粹数字上的巧合，并没有经验事实支持狄拉克的观点，于是狄拉克把他的想法束之高阁许多年。但是约当发现它很有趣，想深究它，并将它与泡利投影相对论的形式联系起来。

在约当的细化中，引力常数成了一个不断变化的标量场，就像在气象图上温度的波动变化，这就把广义相对论转变成一组更为复杂的方程。爱因斯坦张量（用来描述几何性质）和应力能张量（详细描述物质和能量的性质）不再是直接的比例关系，而是更加复杂的关系。

约当原始的手稿描述了他的想法。它被德国刊物接收，但是这份刊物战争结束就停办了。很幸运，1946年泡利成功地弄到了校样的复印件并把它移交给伯格曼。伯格曼非常震惊，因为他发现约当的理论和他与爱因斯坦发展的模型几乎完全一样，但是他的文章却被拒绝从未发表。惊讶之余，伯格曼深受鼓舞，对这个方向重燃兴趣。“事实是，这个领域的另一个工作者独立提出了相同的观点；这暗示了它与生俱来的可行性。”伯格曼写道。³⁶

伯格曼告诉约当，他的模型仅仅需要用一个张量场代替最后位置（第五行第五列）的度规张量常数，就可以表述成卡鲁扎理论那样的五维形式，其形式将更加优美。如果人们把度规张量想象成包含几何规则的一个五乘五的矩阵，张量场就会占据在右下方角上的一个方格，这个张量场表示保证了引力随着

199



P·约当，在第二次世界大战期间他通过从事卡鲁扎-克莱因理论的修正形式，在量子理论方面名声鹊起。在许多物理学家眼中，因为加入了纳粹组织，他的地位一落千丈。战后，作为革新的物理思想家，他重新获得人们的信任。

时间缩小。就此，伯格曼在他自己的文章中发表了这些观点。

同时，另外一个研究者西里（Yves Thiry）已经独立地发展了相当于五维理论的方法。西里是一位知名数学家安德烈·李希纳罗维兹（André Lichnerowicz）的学生，他致力于用一个简单的方法导出卡鲁扎的方程，最终也得到了约当的结果。标量场理论看上去如雨后春笋一般到处出现。

约当几经周折才发现西里的研究。李希纳罗维兹在一封信中把这个消息告诉了泡利。³⁷约当没有因为竞争的出现而泄气，反而越发地努力前进，希望能在天体物理学和宇宙学中应用他的理论——包括对行星如何形成和为什么宇宙会膨胀的设想。

约当战后生活在格廷根，这是他仅有的一次拿着他的理论和卡鲁扎本人讨论的机会。因为格廷根当时房源非常紧缺，卡鲁扎就热心地让约当和他的家人暂居于数学学院。他们住的地方空间狭小，很不舒适，一开始连家具都没有。他们用改造过的清洁工具做饭，睡觉时用薄薄的窗帘相互隔开。对于工作的地方，卡鲁扎给约当在一楼提供了一间小小的办公室。尽管生活如此艰辛，约当还是非常感激卡鲁扎的慷慨热情并欢迎他有价值的建议。³⁸

1948年，当约当获得汉堡大学的职位后，从赤贫到暴富。他家不再借用办公室生活，在郊外的高级住宅区找到了一个宽敞的地方。为了掩盖他以前和纳粹的关系，他加入了受人尊敬的基督教社会主义党，不久后成了国会一员。在泡利的鼓励，恩格伯特·夏金（Engelbert Schucking）等研究生的协助下，约当继续他的引力研究。他让夏金努力工作试图找到他奇怪方程的解。作为副业，他为公众作报告，内容从科学宗教到超自然的东西。³⁹他也出版了一本五维理论科普书，《引力和宇宙》，褒贬不一。⁴⁰

感知之门

考虑到战后精神和灵魂的讨论非常流行，约当涉猎精神的世界并不足为奇，与他同道的还有他的密友泡利。他和泡利对心灵感应都充满兴趣，希望存在一条单一的自然法则，不但可以解释粒子，还能解释思维的即时沟通。而泡利则被他曾经亲密的同事激发，与荣格一同把量子观点与心灵心理学联系在一

200



起。荣格在这方面出了一本书叫《同步性：非因果性联系的原则》（*Synchronicity: An Acausal Connecting Principle*），泡利对此亦有贡献。

对第六感的好奇与科学家对看不见的维度的迷恋紧密相连。在 40 年代末 50 年代初，他们互通的信件中，泡利和约当讨论额外维度理论的时候，往往提到荣格的观点。同一时期的其他学者，像卡鲁扎和他的助手乔哈得·莱拉（Gerhard Lyra），也探究了类似的问题即这些领域是否存在联系。这些科学家，在不同程度上，都想知道是否存在一种感知超越时空的维度的方法。就在卓别林《城市之光》中那位失明的卖花姑娘，医学上的突破让她重见光明；而我们，是不是也可以通过某种方式，探测到我们感官不可及的领域呢？在我们的梦境中，也可能在特定的超验体验中，我们的思想都能否无拘无束地达到这个层次呢？

哲学家汉斯·赖欣巴赫（Hans Reichenbach）强调，可以通过对颜色的感觉，类比地描画出高维的空间。他假设存在一个世界，这个世界中的色谱表示了第五个维度。如果两粒台球在这个世界撞到一块，当他们越来越远的时候，它们的颜色也会越来越接近，相互挨着的两个球的颜色完全一致。赖欣巴赫只是用颜色说明他的观点，他暗示第五维可能存在于一个我们无法感知的世界，或者是一个我们还未意识到的世界。⁴¹

莱拉跟卡鲁扎做博士工作，接着留在格廷根当教授，他觉得把额外维度理论和超自然混合到一起很合适。在约当和卡鲁扎的鼓励下，他主要的研究方向包括莱拉几何，一个对标量张量理论进行了修改使之很好地兼容外尔规范方法。⁴² 不过，

莱拉的业余爱好更为广泛，从探索灵魂体验到调查不明飞行物（UFOs），他曾经在威斯巴登（Wiesbaden）为德国 UFO 协会作了一个报告，题目为《关于对当代物理基础修正的必要性，以求理解超心理学和宇宙学现象，从而架起通灵与四维的桥梁》。⁴³

这类的关联让人回想起 19 世纪末的通灵研究协会。当时，它甚至吸引了诸如威廉·克鲁克斯（William Crookes）成为珠勒的信徒。事实上，在 19 世纪 40 年代到 50 年代，这个协会见证了通灵在大众的再次流行，一部分原因是由于美国心灵学家莱茵（Howard Banks Rhine）做的著名实验。莱茵在杜克大学工作，检验了许多实验对象的“心灵感应”能力。他通过统计方法观察他们猜测的有效性是否超过纯粹偶然的瞎蒙。莱茵创造了“超感官感知”（extrasensory perception，简称 ESP）这个词来描述他的发现。

1952 年，泡利和约当对莱茵的试验产生浓厚兴趣，并将它们与荣格的“同时发生”理论（偶然事件的相关性）联系在一起。他们喜欢对照各自笔记，以关注试验的最新进展，虽然他们的努力引起争议。

1952 年，泡利偶然被一个特别的東西牢牢吸引。他在给约当一封信的末尾提到，“通过那个途径，我也听说了在英格兰关于莱茵试验的大胆的数学推断（存在许多维度）出现在通灵研究协会的期刊上。你知道这回事吗？”⁴⁴

泡利提到的那篇文章是精神病学家史密斯（John R. Smythies）写的，标题为《思想和高维》。⁴⁵史密斯用一个宇宙的七维模型解释了莱茵的发现和其他自称为超心理学的试验。



其中的四维基于真实的物质，其余三维包含“思想材料”：意识的初级阶段。这两个世界由因果关系联系在一起，但是有各自内部的运行法则。因此，按照这种方法，超感官感知包含在精神领域，而人被孤立于物质空间。

202

史密斯向英国哲学家普莱斯（H. H. Price）和布罗德（C. D. Broad）详尽讲解他的理论——他们两个人都对心理学感兴趣。在访问苏黎世期间，史密斯就集体无意识的本质与荣格交换意见。⁴⁶最近，他又与物理学家讨论宇宙中思想的地位。跟随卡鲁扎-克莱因方法的最新进展，他把他的理论扩展到十三维甚至更多维——甚至将弦论与膜世界囊括其中。⁴⁷

史密斯和汉弗莱·奥斯蒙德（Humphry Osmond）合作的关于精神分裂症的工作可能更为人所知，时间也在 50 年代早期。他和奥斯蒙德在英格兰和加拿大用致幻剂墨司卡灵，一种从威廉斯仙人球花中提取的物质做实验。根据这个实验，奥斯蒙德造出了“迷幻的”（psychedelic）这个词。在他们有争议的理论中，他们研究用墨司卡灵诱发人的幻想，从而洞察精神分裂症的特质；终极目标是找到治疗的方法。

他们工作的一个热心的支持者是英国作家赫胥黎，《美丽新世界》等小说的作者。当奥斯蒙德指导赫胥黎使用墨司卡灵后，这位作家开始提倡使用药物作为一把打开感官新入口的钥匙。赫胥黎在他 1954 年的书《感知的大门》中详述了他的体验，尽管他没有在书中清晰地讨论高维空间，但是他描述了迷幻剂如何帮助自己突破感官的约束。赫胥黎的记录让公众再度重建维度与非现实世界的联系——特别集中于 60 年代发起的迷幻剂运动。与这本书同等重要的例子是《暮色区

域》(*The Twilight Zone*), 50年代后期的一部美国电视连续剧。

超立方体屋子的钥匙

“在人类所知之外, 存在第五个维度,” 当奇异的画面充满屏幕时, 一个神秘的声音解释道, “这是一个与空间一样广阔, 与时间一样无限的维度。” 由此引出了《暮色区域》的第一章。这是由罗德·塞林(Rod Serling)创作讲述的故事, 至今它仍被认为是最杰出的科幻小说之一。听众被一个陌生侵入者、精神力量以及地狱般的环境组成的神秘的故事吓呆了。故事情节很简单: 额外空间恶魔滋生, 人们得到非常紧迫的讯息, 要尽一切可能远离这个离奇的地方。事实上, 在接下来的一章“小姑娘迷失”中, 好奇的女孩通过她床上的横贯维度的传送门, 来到他父母的恐惧中, 并且陷在那里出不去。她的命运以夸张的方式教育人们: 超空间接触不是儿戏。

203

对于那些狂热爱好者来说, 这些主题不会让人大惊小怪。许多的科幻情节都以此为基础。从30年代到50年代, 科幻小说以诸如《神秘传说》(*Weird Tales*)、《令人惊骇的科幻小说》(*Astounding Science Fiction*)、《惊异的故事》(*Amazing Stories*)为标志, 迎来了它的黄金时期。在一页页文字背后的这些深思熟虑的作者, 都是外尔、威恩等人富有想像力的继承者。他们用与时俱进的科学知识丰富了陈旧的观点。

这种文学流派的先驱之一是美国惊悚作家拉夫克洛夫特。拉夫克洛夫特细细揣摩他在量子物理、相对论和多维数学年代



所学到的东西，并将其加入到故事情节中。他相信，对科学真实的描述，将有助于他的读者接受故事中非常不可思议的方面，故事对他们的刺激才能达到最大。

拉夫克洛夫特的故事大多以远古的一种生物“伟大古老一族”为描写对象，它们等待合适的时机移居地球。很显然，这些生物熟悉黎曼和高斯。拉夫克洛夫特提到它们所构建的城市，其中皆为扭曲的形状和奇奇怪怪的搭配，以此说明可以用非欧几何作为离奇建筑物的建筑准则。他也提到，这些生物来自“我们物质世界之外的某个尚不清楚的空间或者维度。”⁴⁸

拉夫克洛夫特经常将高维想象成夜间漫步的小道。在发表于1934年的《穿过银匙之门》(*Through the Gates of the Silver Key*)中，主角试图寻找“从枯燥拘束的清醒状态下的真实进入梦境动人的美景和传说中的其他维度的宽广大道的方法”。当他在无穷无尽的梦境中徘徊的时候，遇到了古老一族。他们向他解释“三维世界多么幼稚拘束，在已知的上下、前后、左右的方向之外，还有无尽的其他方向。”族人继续教导他这些关系，“三维中的立方体和球，是……从相应的四维形状中剪裁得到的，而只有在猜测与梦境中，人们才能理解第四维；以此类推，四维的形状又是从五维的形状中剪裁得到的，如此下去，一直到最原初的无限那样令人眩晕的遥不可及的高度。”⁴⁹

在《女巫房间中的梦》(*Dreams of the Witch House*)里，他把高维空间的存在描写成一个更大的恐惧之源。一个工作过度的大学生，沉浸于现代物理的复杂和超自然体验的传奇之中。当他暂住在一间“古老的女巫房间中”时，发现了很多东

西，在那个怪异的环境中，他开始将两门学科联系在一起，并逐渐理解到巫师甚至比“普朗克、海森伯、爱因斯坦和德西特”⁵⁰知道更多的高维数学知识。因为他的黎曼几何知识非常扎实，甚至他的教授对此也印象深刻。他发现宇宙在两个遥远的点之间，存在超空间连接的可能性。他充分相信，自己在女巫的房间中发现了这样的传送门，可以从中诱发出这个世界之外的无可名状的恐惧。

尽管拉夫克洛夫特自认为自己多少算学院派，但是他的知识来自自学而不是大学训练。而另外一位作者铎特（A. J. Deutsch）却来自哈佛大学天文系，他的作品就基于本人的直接经验。不是哈佛的教书经历，而是学校和家庭的交通往返启发他的灵感，在1950年他写出经典的故事《名为牟比乌斯的地铁》（*A Subway Named Möbius*）。

波士顿地铁系统是由许多互相缠绕的分支组成，它的复杂世人皆知。铎特想象，它变得一团乱麻，以至于自发地将自己变换为多维的牟比乌斯带。当系统的一部分停留在真实空间中，它的另一部分就会藏在超空间的管道中。列车将会被吸入，可以听得到但是看不见，因为它们在高维中沿着铁轨运行。

《他建造了一个弯曲的房子》（*And He Build a Crooked House*）和上面主题类似。海因莱因（Robert Heinlein）创作了这个故事，他想象了一个和布雷格登（Claude Bragdon）差不多的建造师，用摊开的超立方体建造房子。超立方体由8个立方体组成，当它完全展开的时候，就像一个三维的十字架。出于便利，设计师把每一个立方体都设计成单独的一个房子：



起居室、饭厅等。对这个功能多样而且高效的布局，他自豪不已。

205

当设计师把房子的新主人带来参观的时候，麻烦出来了。他们并不知道，这个时候一场地震让这个已经展开的超立方体塌陷成一个完全四维的超立方体。这个温暖舒适的住处变成了一间有趣的房子，房间之间以想象不到的方式错综复杂地连在一起。比方说，居住者发现他们都回到了第一层。此外，在一间房子里，他们发现从窗外望去，完全是一幅离奇的其他世界的景观。不过幸运的是，当另外一场地震来临，让我们的房子从这个空间消失完全进入另一个维度之前，所有的人都成功地逃离了出去。

涉及高维的科幻小说的另外一个例子（这样的例子有许多许多）是马德琳·兰歌（Madeleine L'Engle）的通俗儿童小说《时间的皱纹》（*A Wrinkle in Time*），它发表于1962年。在这个动人的故事里，三个神秘的女人带着孩子们寻找他们的父亲——一个奇怪地消失于另外星球上的科学家。女人们把孩子从地球传送出去，通过超空间的捷径到了时空之外，这样的旅行让人回想起在《平地》（*Flatland*）中，正方形缓缓升起的情形。他们向幼小的探险者解释其工作原理：“对五维的超立方体，如果你把它加入其他四维中，你就可以无需绕漫长的一圈便可穿越空间。”⁵¹

这样那样发人深思的故事影响一代又一代的读者——虽然是通过想象的方式——介绍科学界中令人好奇的高维空间概念。充满讽刺的是，当这些概念在小说中夯实基础的时候，它们在科学中却失去了动力。在20世纪50年代到60年代之间，

关于统一场论的五维理论几乎没有任何工作发表。当兰歌(L'Engle)散发着墨香的新小说摆上成千上万个书架，熠熠生辉之时，卡鲁扎和克莱因恢宏的五维景象却只能尘封于发黄的书卷中，放着发霉。粒子物理的发展正处于全盛时期，几乎所有的理论家都有许多别的难题需要解决。

第 10 章 | 规范弱力和强力

自古以来，人们就渴望能用尽可能少的基本概念理解复杂的自然。这种执着的追求，用费曼的话说，定一个“环环相套层层相因的过程”。自然哲学的首要任务就是发现存在的最深的一层；第二个任务，是关注在这一层中，推动和制约物质之间运动的基本力。规范场理论……的伟大，在于它们将这两者合二为一。

——阿卜杜勒·萨拉姆，诺贝尔奖演讲，1979

平行的历史

206

科学理论犹如年幼的孩子，经过一段时间飞速的成长后，进入相对成熟的时期。当它们突飞猛进的时候，发展显而易见。但是，为了以后成功构建内部框架，它们也需要一段休整的时间。当卡鲁扎-克莱因理论开始变得极为重要的时候，亚原子物理的一些基本变革“山雨欲来风满楼”。

当爱因斯坦 1943 年放弃卡鲁扎-克莱因理论，而约当、伯格曼和西里的标量张量理论又无人问津，对更高维的讨论暂时告一段落——它被粒子物理和场论的巨大发展迎头赶上。新一代的理论家紧紧抓住物理学中充满激情的领域，他们崭新的观点和技术令诸如爱因斯坦和玻尔等老一辈人困惑不已。²⁰⁷

一天，爱因斯坦得知有人来访，于是悠闲地待在家里。来人是约翰·惠勒，他迫不及待地想告诉爱因斯坦他对量子力学一个革命性的新方法的看法。约翰·惠勒很理解爱因斯坦的置疑，不过他希望新颖的观点可以说服爱因斯坦。爱因斯坦热情地欢迎同事的到来，两人在楼上的书房坐下讨论。

惠勒小心翼翼地给爱因斯坦解释他的学生理查德·费曼 (Richard Feynman) 提出的“对历史求和”的方法。按照费曼的做法，为了计算粒子之间任意的相互作用结果，可以考虑粒子相互作用所有可能的途径，然后各自乘上一个概率因子，再对它们求和。比如说，如果人们希望预测两个电子相撞以后，转成直角相互远离的概率，如果用这个方法计算，他们就要把这个过程中所有可能的路径都考虑进去。费曼想出了一个办法，只需画张简单的图，就可以把各个路径几率列出来。

这个方法令人不快的部分是它提出任何可能发生的事情的确同时发生。如果在人们的交往中也这样的话，那将是悲观主义者的梦魇。想象如果某个人即将被一个老板面试，他会在脑海中浮现出面试成功的种种可能，面试的最终结果一定程度上，将是对所有可能性权重求和的结果。“我能做出或者说出超过一千种不同的事，让我被扔出办公室，”人们可能闷闷不乐地总结道，“每一个人都不会有好结果。”



虽然“对历史求和”的概念非常动人，但爱因斯坦并不感冒。“我依然不相信善良的上帝会掷骰子，”他对惠勒说，爱因斯坦停顿一会儿，让惠勒理解他的想法，然后这个老科学家接着说道，“可能我也有错的时候。”¹

征服无限

1948年，费曼提出了他的新方法——费曼图等工具。对于最令人畏惧的量子电动力学（quantum electrodynamics, QED）——电磁场的量子理论无法自洽的问题，费曼借此给出了精巧优雅的解决方法。这是所谓的电子自能的问题，泡利和他的助手罗伯特·奥本海默在20年代晚期到30年代早期都在全力对它。在一定的条件下，一个电子可以与它自身激发的场相互作用。比如说，它可以发射一个光子然后立即把这个光子重新吸收，这类寿命极其短暂的“虚光子”是海森伯不确定原理与生俱来的不严格之处。人们的探测距电子中心越近，虚光子云的影响就越大，如果人们依据狄拉克方程和别的量子技巧计算此类自能，最终会得到非常麻烦的“无穷大”；借用科幻小说中的说法，那完全是无法计算的。泡利、奥本海默等人都意识到自能是QED最主要的困难，一个可能动摇整个物理大厦根基的问题。

大概在相同的时期，三个物理学家各自独立地提出这个问题的解。第一个由日本理论学家朝永振一郎（Sinitiro Tomonaga）提出，可惜他得出结果的时候，正值灾祸连绵的战乱年代，因此直到其他两种方法出现后，他的方法才得以发表。第

二个也是最彻底的解决方法由朱利安·施温格 (Julian Schwinger) 提出的。而第三种方法,也是具有争议的最直观的方法由费曼提出。

他们的方法都包括了一个叫做“重整化”的技巧,就是用聪明的方法消除无穷大,得到精确有限的电子自能。在计算的过程中,无限的项被精心放在一起,正负抵消。这应该算是一个数学上的花招,但是很好很神奇,并且与实验很符合。

人们可以将重整化看成一个账目问题。想象一个商业公司,叫量子企业。以 100000 美元为起始资金,每天进账 1000 美元,同时支出 1000 美元。在所有时间内,收支平衡。公司关心它的长期的收支情况,于是找了个会计(他们独立评估)来计算若干年后,公司还有多少钱。

第一个会计不是很聪明。首先,他计算总收入,不单单是数年,甚至数个世纪的收入都累加起来。当他不停地把数字输入计算器,总额越来越大。最终,当他计算了许许多多世纪的收入以后,计算器溢出。“无限大”,他记下结果。然后,他决定从总额中减去每日支出。“无限大减去 1000 美元仍然是无限大”,他一遍一遍地记下来。当他要提交报告的时候,他宣布“我很高兴地告之,如果您将现有计划保持下去。您的公司利润有可能无限大。”

209

第二个会计更聪明。她将数据组合,以此得到收支差额。很明显,每天从 1000 美元的收入中减去 1000 美元的支出,得到 0 美元;最开始的 100000 美元,加上无穷多的 0,结果还是 100000 美元。她向公司提交了这个有限大小的数据,为公司的长期规划提供了更为现实的依据。这就是“重整化”的优



越性。

施温格和费曼在宾夕法尼亚波可诺山会议上各自提交了他的结果。玻尔和其余众人，好奇地聆听年轻一代的物理学家将要说些什么东西。施温格第一个开始，讲了整整5个小时，将所有的黑板上都写满了公式。他系统地介绍如果重新定义一些项的话，可以把QED这个地毯中每一个无穷大都打个摺隐藏起来。比如说，观测到的电子质量，通过考虑其自能得以解释。他充满耐心地说服听众，他的方法是自洽，相对正确并且完备的。玻尔和大多数与会者确实印象深刻，尽管他的计算十足地乏味，令众人没有太多热情。

费曼接下来讲。他是一个打破传统的人，他撬开了保存世界秘密的墨匣子，他享受着找到一个独一无二的方法解决疑难问题的美好感觉。他没有用大量的公式，只在黑板上画来画去。他用一条带箭头的直线表示电子，光子是弯弯曲曲的线，等等。他用交叉的线条表示粒子间的相互作用。这是他个人简略的表示方法——一种以后被称为费曼图的技术。

玻尔对于量子理论卡通式的表达勃然大怒。他就像一位刻板的教师，给费曼解释不确定性原理不允许在粒子之间画一条笔直路径，他认为费曼一定是什么东西没弄明白。费曼反驳道他已经知道这回事，但是图像仅仅是一种简洁表示的方法而已。²¹⁰ 费曼觉得他被量子世界受人尊敬的领导者误解，沮丧地离开了会场。²

汉斯·贝特（Hans Bethe），那个时候安慰过费曼的人，谈到“施温格将已知的理论深化，与此同时费曼创造了一个全新的技术简化……实际的计算量。”³

这以后不久，奥本海默收到了朝永振一郎解决方法的复印件，然后弗里曼·戴森（Freeman Dyson）证明了所有的三种方法都是等价的。尽管施温格详尽的解决方案为他赢得了人们巨大的尊敬、热切的哈佛学生以及诺贝尔奖（与另外两人分享），但是费曼精致的图形解释成为了标准技术。

重力的麻烦

一旦人们充分了解量子电动力学，引力就只能躲在墙角羞涩得不敢见人。物理学家希望也能了解她，但是不知道如何去接近。因此，仅仅只有少数人敢于尝试。

彼得·伯格曼刚刚发表他关于五维理论最后的研究论文。他的内心有个声音不断地呼喊，长期以来作为爱因斯坦的助手按照他的要求做事，没有自己的意愿；他迫不及待地想回归最初的雄心壮志。作为布拉格大学毕业的学生，他强烈地渴望将量子理论和广义相对论统一起来。如今，他在锡拉丘兹负责一个全新的项目——那个时候，这里是美国唯一的引力研究中心——他最终如愿以偿地找到机会去实现人生的梦想。

但是，积年累月的习惯让他觉得自己的想法有必要首先通过爱因斯坦。可以预见，他的导师没有任何兴趣。从恩格伯特·夏金的叙述中，我们得知“伯格曼询问爱因斯坦，他是否有意量子引力方面的工作。爱因斯坦说‘你现在完全是独立的。’爱因斯坦祝他成功。”⁴

伯格曼接着开始首次后 QED 时代的尝试，量子化引力。在量子理论的初期，罗森菲尔德（Rosenfeld）曾经试过但失



败了，伯格曼希望能够找到某个方法巧妙地解决这个问题。他在这个方面最早的工作成果，发表于1949年，文章开头的宣言就告知世人他远大的目标：

探究整个的真理，是实验和理论物理学家孜孜不倦的终极目标；现今，我们有权说物理学中有两个伟大的理论框架，它们包含了“真理”极为重要的部分。其中之一是现代量子物理，它在力学和场论皆有应用；第二个是广义相对论，在作者看来，至少它也是一个略有瑕疵的“经典的”（比如，它是非量子化的）场论。

伯格曼意识到，统一量子理论和广义相对论面临的主要问题之一便是这些模型的根本上的区别。量子理论考虑波函数随时间的演化，这种波函数包含粒子在空间中运动的坐标与动量的概率信息。但是，对广义相对论而言，本质是度规；度规描述时空与空间自身，度规并不随时间变化。因为它是四维的，所以一定程度上不受时间影响；因此它并不服从量子动力学。

于是，伯格曼相信，关键的一步是寻找引力的经典变量。这些参数应该与位置和动量类似，可以应用海森伯的不确定性原理和其他量子定则。不受时间影响的度规被这些动力学量取代，它们给出一个等价的但是比量子理论更兼容的广义相对论形式。在文章中，他没有找到这些参数，但是他觉得自己的出发点非常美妙。他把文章献给妻子，与这位最真挚的朋友共享喜悦。

就如伯格曼的同事乔舒亚（Joshua Goldberg）叙述的，“彼得用白色的记号笔在首篇文章上写道，‘最亲爱的玛戈特，我的最爱。可能有些自私，但这是我第一份引以为豪的工作。’这些话让他的导师对他颇有微词。”⁵

不过，伯格曼还是和爱因斯坦保持紧密的联系，以使他可以跟得上这个领域的发展。偶尔彼得一家会开着破旧的黑色庞蒂亚克前往普林斯顿，访问默谢街（Mercer）他熟识的那座孤独的白色房子。伯格曼的儿子恩斯特回忆他孩提时代的一次造访：“我记得他们在一个荒废的公园里漫步，那可能是爱因斯坦的后院，他们讨论一些不可思议的话题。他们看起来非常热衷于他们的讨论，完全不在意其他人。爱因斯坦穿得很邋遢。我很困惑，我的父母关心我的着装打扮，不过好像有的人并没有树立一个好榜样。”⁶

不久，伯格曼请他的导师写一封推荐信，以此获得国家科学基金的资助进行量子引力方面的研究。尽管爱因斯坦自始至终对这个项目持怀疑态度，但是仍然极为热心：

伯格曼博士的申请涉及现代物理一个尤其重要的问题。所有的物理学家都相信量子理论和广义相对论的真理。但是，这两个理论基于不同的基本概念，到目前为止，所有将它们统一到一个系统中的尝试终告失败。如果是我自己做决定的话，我会授予他基金资助……即使在我看来，这一点上达到伟大目标的可能性相当小。⁷



复兴相对论

德威特（Bryce Seligman DeWitt）来到哈佛时，还是个乳臭未干的小子。刚刚脱离纳粹，他参加了施温格的第一次课——关于电磁场领域，至少可以说，这是一门要求非常高的课程。像卡鲁扎上课一样，施温格授课绝对不带笔记，每次上课都可以准确地接着上回继续。期末考试的时候，课堂“让人眩晕，一片寂静”，因为学生们正在与那些只有施温格才能编出来的恐怖至极的题目搏斗。⁸

不过靠着杰出的数学天分，德威特还是让他的老师吃了一惊。他希望能与施温格共事，唯一的问题就是找到共同兴趣。德威特不像他的绝大多数同辈，他爱好广义相对论，但广义相对论那个时候在哈佛没有人理睬——甚至在全美国的任何地方都是如此（除了 1949 年后的锡拉丘兹）。如果他想在这个领域深入进行下去，就不得不找个方法将它与当前流行的研究课题结合起来，比如量子场论。德威特回忆道：“我根据伯格曼的书自学了广义相对论。我觉得它是一个非常漂亮的理论。我选择朱利安·施温格作为我的理论导师，他已经为量子电动力学发展出了所有的这些框架。我想看看我们能不能做出一个相似的‘量子引力动力学’，有什么办法呢，还不是要去试一下，我天真地这么想。于是我去找他，问道我能不能去做这个，他说没问题。”⁹

和德威特见面可能“一共就 20 分钟”，施温格在这个方面给了他最好的建议。当德威特雄心勃勃地想把电子、光子和引

力统一到一个理论中去的时候，他遇到麻烦了，施温格建议他略去电子，把问题简化。但是，大部分问题都是靠德威特自己解决。“可能我认为从他那里已经得到了很好的建议，后来就把他撇到一边了。”德威特这样猜测。¹⁰

斯坦利·狄塞（Stanley Deser）是施温格后期的一个学生，当德威特正在为论文奋斗的时候，他正在上基础课。狄塞不像德威特，一开始他对与引力有关的任何东西都不感兴趣。哈佛是粒子物理、原子核物理以及量子场论的大本营。一个年轻的研究者怎么会希望做别的事呢？

狄塞从哈佛毕业，在高等研究院找到一个博士后职位，他对引力方面的印象没有任何转变。奥本海默曾经担任研究院的主任，对于爱因斯坦在统一场方面看上去毫无意义的努力，他除了诋毁再无别的。对他来说，爱因斯坦后期的努力只剩下困窘。“奥本海默警告我们不要和爱因斯坦有任何关系，他在广义相对论方面无益的兴趣，可能会让我们受到恶劣的影响。”狄塞回忆道。¹¹

不过狄塞还是去参加了爱因斯坦的一个讲座。一开始，因为奥本海默的警告，加上需要坐着听一堂德语报告让他不情愿参加。“我为什么要浪费一个小时听一些无稽之谈？”他对一位同事说。同事同意狄塞的想法，讨论会没有什么价值，不过他也提醒狄塞，“如果你错失见到爱因斯坦良机，你拿什么跟你的孙子交待？”狄塞比较感情用事，他又开始摇摆不定，重新考虑了。“于是我去了，报告要比我想的更加无聊。他是用德语讲的，房间里可能就十个人。”¹²

命运弄人。尽管狄塞一开始厌恶引力和统一理论，但很多

214



股力量扭到一起，让他成为那些领域的重要人物之一。狄塞坚持这和他与奥斯卡·克莱因的女儿爱斯贝斯相爱没有任何瓜葛，那个时候爱斯贝斯正在普林斯顿访问。他们的爱恋在欧洲继续，一直持续到狄塞在哥本哈根得到了第二份研究员工作。

同时，约翰·惠勒在普林斯顿另外一个伟大的学术中心——普林斯顿大学工作（非高等研究院），他开始熟悉引力理论艰深的图景。在原子理论留名之后，他想探究那个令他在默谢街上年长的邻居痴迷的领域。这个领域没有任何相关课程，因此惠勒决定自己开设一个，他觉得学习广义相对论最好的方法就是教授它。他的课程以伯格曼的书作为教材，非常受欢迎。不久，他成为这个研究领域主要的专家之一。

惠勒不时地会觉得他的同事们仅仅是迁就他新的兴趣，而没有非常在意它。“对于相对论的态度”，惠勒回忆道，“每个人都有误会，不过情有可原。”¹³

在 19 世纪 50 年代到 60 年代期间，伯格曼所在的锡拉丘兹和惠勒所在的普林斯顿成为了美国广义相对论复兴的中心。当德威特在北加州大学获得了一个职位，他和妻子莫尔（Cécile DeWitt Morette）在查布尔希尔（Chapel Hill）建立了另外一个主要的相对论研究中心。思契德（Alfred Schild），英费尔德的一个学生，在得克萨斯州也设立了研究中心。狄塞（最终留在布兰德斯）、阿诺维特（Richard Arnowitt）（他在西北大学工作，然后来到了德克萨斯州的 A&M）、戈德堡（Joshua Goldberg）和纽曼（Ted Newmann）（都在伯格曼的领导下在锡拉丘兹工作）等人齐心协力，加入到探索之中。对于这些理论物理学家中的多数人来说，如何量子化引力并将其纳入主流物

理研究中去，是问题的关键所在。直到那个时候，许多人才相信，把各种力统一开始变得现实（通过卡鲁扎-克莱因等办法）。

垂老的赞歌

当伯格曼和惠勒让相对论在美国的研究兴起时，泡利已经是欧洲广义相对论公认的领导者之一了。泡利在约当理论方面的兴趣成为他沉浸于这个领域的原因。此外，因为泡利获得诺贝尔奖，他觉得欠爱因斯坦一个人情，希望借机偿还。纪念爱因斯坦的思想将是最好的回报。²¹⁵

相对论发现 50 周年纪念随之而来，泡利希望以此表达他的尊敬。他同意在瑞士首都伯尔尼组织一次大的会议，纪念这个事件。瑞士政府和欧洲科学界普遍坚定地支持，给予爱因斯坦“自己人”般的荣誉，这很大程度上是因为他在纳粹统治期间所受的恶劣待遇。爱因斯坦认为这个想法有价值也予以支持。

不幸的是，那个时候爱因斯坦身体状况糟糕，他已经得知他的生命快走到尽头。1948 年，内科医生通知他的腹部有一个柚子大小的动脉瘤，它的表皮相当厚实，由此留着比做手术切除风险更小。不过，它逐年长大随时都有破裂的危险。接着到了 1954 年，他开始贫血。考虑到旅行的危险性太大，他决定提前写信给伯尔尼的委员会，表达歉意。¹⁴

当爱因斯坦即将终老时，另外一个统一理论的创建者已过早地逝去。西奥多·卡鲁扎于 1954 年 1 月 19 号离开人世。即



将退休的时候，他乘车回家的时候心脏病突发。卡鲁扎死的时候，他的助手乔哈得·莱拉正和他在一起。卡鲁扎才从一场流感中恢复过来，决定开始工作，他和莱拉正在一起监督一场测验，当时莱拉注意到这位教授显得疲惫不堪，莱拉提出由他来接管第二部分的测验，然后护送他乘公交回家。

当卡鲁扎坐到位子上的时候，显得异乎寻常的平静。几分钟的寂静后，莱拉观察到他闭上了眼睛，头往后仰去，开始呻吟。莱拉大声地叫着他但没有任何反应，莱拉立即让司机停车。司机招呼出租车护送卡鲁扎到了医院。直到最后莱拉仍然存有希望，觉得卡鲁扎只不过晕倒过去，能够恢复。但是医生进出租车后，告诉他卡鲁扎已经死了。很明显，流感严重地损害了他的心脏。¹⁵

没有历史记录表明爱因斯坦得知卡鲁扎的逝世。那个时候，距他们最后一次通信已有 20 余年。在纳粹统治期间，爱因斯坦和他的同事得到的冷漠对待，令他们与许多德国人没能保持联系。他和马克斯·冯·劳厄等以前的合作者保持联系，但这仅仅是少数的几个人。

此外，爱因斯坦长期以来将卡鲁扎的模型束之高阁，而偏爱其他方法。在他最后的几年里，他致力于他的“引力的一般性理论”，一个把度规张量视为对称（行和列之间可交换）和反对称部分的结合的模型。其中，对称部分与引力有关，而反对称部分与电磁场有关，他希望通过四维时空进行统一。他的理论不仅在内容上不合时宜——完全忽视了原子核力、自旋以及许多现代物理中的其他元素——并且和 19 世纪 20 年代的一个失败模型类似。他最后一位助手，布鲁瑞·考夫曼帮助他做

了这些计算。

1955 年 4 月 13 日，爱因斯坦的动脉瘤破裂。尽管痛楚万分，他坚忍着拒绝手术。“当我想要离开的时候，我就会离开，”他对医生说，“我已经做完了我的事，是离开的时候了。”¹⁶

接下来的几天内，他的病情反复无常。到了濒临死亡的时候，他非常警觉地要来纸笔和眼镜。只要他的手能够动，他的眼睛能够看，他就想继续他统一理论的工作。爱因斯坦逝世于 4 月 18 日的午夜。

爱因斯坦最终没能完成他的梦想，通过单独一个决定论的方程描述引力和电磁场。不过，得益于他强大的公众影响力，包括超越额外维度的可能性的统一的讨论获得了人们更多的关注。他的思想激励了许许多多勇于统一所有自然界现象的人，这产生了今天的多维方法，比如超弦和膜模型。爱因斯坦“万有理论”的想法，可以优美地解释自然分立与统一的一切方面，这是他为科学留下来的最具挑战性的目标。²¹⁷

50 周年纪念

1955 年 7 月 11 日，泡利召开“相对论 50 周年纪念”会议，每一位与会者都倍感苦涩。对于那些与爱因斯坦熟识的人，包括泡利、玻恩、外尔、冯·劳厄以及许多他以前的助手比如伯格曼、巴格曼、英费尔德、罗森和考夫曼，爱因斯坦的离去令他们痛苦不堪。对他们来说，很难只考虑相对论而不忆起其杰出创立者的温暖和循循善诱。不过，有些东西令他们鼓



舞——研究这方面的学者的数目以及他们宽广的研究视野，这使他们意识到在爱因斯坦的追随者身上，他的灵魂永存。

对于一些移民的科学家，例如伯格曼，这次 50 周年纪念是自战争开始后他们第一次回到欧洲。伯格曼带着全家过来待了 3 个月，他发现可以利用这个机会查寻在德国失散已久的亲戚——那些在大屠杀中幸存下来的人。

对其他一些与会者，诸如约当和克莱因，这次会议为他们提供了一个论坛，可以讨论他们关于统一和宇宙的不寻常的理论。约当谈到改变万有引力常数的变更，而克莱因做了两场独立的报告。第一个有关引力的量子化，第二个涉及宇宙中星系的行为。作为 19 世纪 40 年代提出的，伽莫夫“大爆炸”模型的候选，克莱因发展了总星系理论：一个有限的、膨胀的类似于银河的系统总集。克莱因的第二场报告结束后，英国科学家霍伊尔（Fred Hoyle）和邦迪（Hermann Bondi）提出他们关于宇宙稳恒态模型的最新的观点，一个更加著名的对大爆炸的驳斥。

一些与会者来自巴黎，这时的巴黎已经成为相对论研究的稳固的中心。它不久以后在卡鲁扎-克莱因理论的发展中担当了中心角色，特别是 20 世纪 70 年代后期十一维超引力发展期间。在伯尔尼会议上，李希纳罗维兹和托尼拉（Marie Antoinette Tonelat）光芒四射，他们各自都在广义相对论和统一问题上颇有影响力的著作，各自都参加了 50 周年纪念，并给出了他们最新的透彻的相对论计算成果。

不是所有的参加者都是名誉卓著的物理学家。像狄塞等人，才刚刚开始他们的物理生涯，在研究的风潮中扬帆，急切

地朝着充满希望的方向前行。在哥本哈根的朋友那里稍做休憩后，他迫切想知道别的地方正发生着什么。

“我多少有点像个参观者，”狄塞回忆道，“我在欧洲到处蹀躞，注意到这个会议的召开。当然，如我被人所警告的那样，我觉得引力是种没用的东西。但是，这可能是我一生中唯一一次有机会看到所有的这些人。”¹⁷

他很惊奇地发现这个会议就像一座自然历史博物馆。他不得不挤开“一个个灵长类的标本”¹⁸，才进入观众席。“这是我参加过的最奇特的会议。大厅里每一个人看上去都是90岁左右，我觉得一些人确实如此，当然大部分并非如此。”¹⁹

在会议上，狄塞高兴地与克莱因，他未来的岳父大人（他现在才60出头，是狄塞估计的“年轻人”中的一个）见面。他们建立了非常友好的关系，在以后的年月中，就物理、引力等话题彼此探讨。

人们追忆爱因斯坦，相互许诺继续就广义相对论观点与国际同行交换意见，会议以此闭幕。泡利表达了他的希望：对爱因斯坦的告别能够成为引力理论发展史上的“一个转折点”。令人心痛的是，泡利做出上述评论三年后便去世。

获得了关注

泡利关于相对论复兴的评论是正确的，人们对相对论的态度正在缓慢但稳步地发生转变。一些主流量子物理学家，比如狄拉克和费曼，开始出现于引力会议上并发表有深刻见解的文章。年轻的研究者不久也紧跟而上。真诚的量子场理论家对相

219



对论的兴趣不断高涨，他们惊叹于这个领域广阔的能力。

在美国新泽西州霍波肯的史蒂文斯技术所，物理学家吉姆·安德森（Jim Anderson）建立了一个工作组，在每年的美国物理协会的会议结束后见面。在那里，诸如伯格曼、惠勒、夏金和德威特等研究人员相互聊天，交换笔记。

他们联合起来解决单枪匹马无法完成的事。比如说，他们艰难地争取他们的文章出现在美国重要期刊《物理评论》和《物理评论快报》上的权利。在 20 世纪 50 年代后期，这些期刊的编辑塞缪尔·古兹米特（Sam Goudsmit）很明确地表示，他觉得基于实验事实的文章，比如粒子散射的测量、原子核衰变模型等等，比所谓的基本理论的东西重要得多。他发表了一篇编辑通知，实际上禁止广义相对论的文章出现于《快报》类期刊上。²⁰ 史蒂文斯团体的成员很敏锐地发现他们小心谨慎的计算结果无法在这些杂志上发表。“我们中的一个人得到消息，”德威特回忆道，“我在会议上报告这件事，我觉得是惠勒在幕后让古兹米特闭嘴的。”²¹

1957 年，莫尔和德威特组织了第一次广义相对论专题的定期会议，这种会议以后出现许多。这次会议，在查布尔希尔举行，吸引了大部分的美国理论物理学家，它比 50 周年纪念更加富有活力朝气。会议集中讨论解决经典和量子引力为数众多的突出问题的创新观点。

会议上，惠勒报告了如何从纯粹的几何结构构建基本粒子的最新观点：这个被叫做几何子（geon）的方法呼应了远隔一个世纪的克利福特的观点。与会者没有几个人同意惠勒的意见，但伯格曼非常关注，他强烈地表示几何子理论并不足够严

格。费曼就此概念嘲笑他以前的导师，诙谐的称呼他为几何子·惠勒。“嗨，几何子”，费曼任何场合都这样叫他。²²

狄塞做了报告，内容一部分是和克莱因讨论后的结果，关于在量子场论发散（无限项）难题中广义相对论所起的作用的问题。对广义相对论的这种实践研究终于让他摒弃对这个领域的怀疑。

220

查布尔希尔会议以及来年在法国北部的大会，分别由最新成立的广义相对论和引力的国际委员会发起，大大促进了引力量子化的发展。1957 年，麦思纳提出一种方法，在引力中应用费曼的“对历史求和”方法。接下来的一年，狄拉克发表广义相对论基于哈密顿（总能量的函数）方法的新的表达式。阿诺维特、狄塞和麦思纳再接再厉地做出了备受瞩目的 ADM 公式，一个对广义相对论框架杰出的修正。ADM 方法实现了伯格曼的最初目标，为引力找到了一个经典变量。通过把四维时空切分为三维空间的超平面，每一个切片决定下一个切片的形状；它允许研究者“奢侈地”考虑引力随着时间的演化。它改变了把宇宙作为一卷一成不变的胶卷的观点，让人们可以一帧一帧地编辑它。

ADM 团队一发现可以对宇宙进行完美的切割，其他理论家，比如惠勒和德威特，就可以通过一系列不同的几何结构，发展出量子形式。每一个可能的三维切片都可以通过其概率权衡，像熟食店里的奶酪，而真实的量子宇宙就是这些可能性组成的三明治。美国理论物理学家在 20 世纪 60 年代中期构建了这样一个模型，导出了著名的量子引力的惠勒-德威特方程。



高维的练习

阿卜杜勒·萨拉姆曾经说过，高维的统一理论已经过时。三十年河东，三十年河西，没有人可以预言哪种方向的物理研究将会风光一时。

如上面的格言所说，卡鲁扎-克莱因方法下一步的发展出人意料：法国暑期学校的练习作业。这是一所由莫尔创办的以求促进物理创新观点的学校，值得人们尊敬。

221 莫尔创建的 Les Houches 暑期学校坐落于法国南部美丽的阿尔卑斯山地区，它旨在使物理学家熟悉本领域最新的进展。每到夏天，学校课程都围绕着当前物理学界感兴趣的课题，由这方面的主要专家授课。这个学校为下一代理论物理学家的成长提供了营养，包括那些将要复兴卡鲁扎-克莱因方法的理论物理学家们。

1963 年，中心主题是“相对论、群和拓扑”。德威特教授其中的一门课。他狡猾地问学生是否能想出一个方法，将卡鲁扎-克莱因理论与杨-米尔斯规范场论合二为一。德威特仔细看过伯格曼的课本，已经知道卡鲁扎-克莱因理论。杨-米尔斯规范理论由杨振宁和罗伯特·米尔斯发展的，是强相互作用力的一个可能的模型，它以一个特殊的二维矩阵群 $SU(2)$ 为基础，试图表示出质子和中子如何通过非阿贝尔（操作顺序导致不同的结果）在同位空间中的旋转而相互变换。这对应于无质量的规范粒子的交换，人们推测这种粒子可能与介子类似，即使介子有质量。德威特建议学生把这两个概念融合到一起，这

样就可以形成一个统一的场理论；在这个理论中，几何结构“可能是所有物理的基础”。²³多么伟大的练习！

德威特的问题预示了统一的下个阶段。他并不轻率，因为他无法注意到所有争论。“看起来很明显，如果你在伯格曼的课本中读了卡鲁扎-克莱因理论的话，就会觉得根本微不足道。你会发现它正好就是杨-米尔斯的流形。”²⁴

狄塞感觉不同。“很少有人被德威特美妙想法打动：将杨-米尔斯场和爱因斯坦理论嵌入到更高维的空间，但我比德威特本人更加坚信它就是一个很明了的东西。”²⁵

不过，德威特的练习并没有预兆完全统一的发现。一个原因就是原始的杨-米尔斯场模型没有充分地解释强相互作用。如物理学家 20 世纪 60 年代意识到的，质子、中子和介子并非基本粒子。它们由夸克组成，夸克之间通过胶子相互作用。胶子而非介子才是强相互作用的真正的传递粒子。

色与味的分类

夸克模型 1963 年由盖尔曼和茨威格 (Georg Zweig) 提出。他们都在加州理工学院工作，致力于研究通过宇宙射线暴和粒子加速器产生的大量新粒子。从 20 世纪 40 年代后期开始，物理学家意识到他们所认识到的原子结构只不过是冰山一角，组成原子的质子、中子和电子是最基础的三种粒子，后来补充了光子、介子和中微子（20 世纪 30 年代人们假设它的存在，直到 50 年代才找到），不久又有许多新成员加入。用各种不同的探测装置，从摄影胶版到沸腾的液态氢的“气泡室”，

222



实验家找到了难以置信的多种粒子所具有的不同质量、电荷、自旋和生命周期等性质。它们大部分不稳定，只有当它们衰变为其他粒子前才能看到短暂的能峰。

怀着植物学家面对一个郁郁葱葱的热带花园时的精神，物理学研究者开始把已知的粒子进行明确的分类。最宽泛的分类是看粒子是否服从泡利不相容原理。根据这条定则，半整数自旋的粒子，称为**费米子**，它与和它一样量子数的粒子彼此排斥。就像每位顾客在餐馆中单独占一张桌子进餐，这迫使其他费米子散开。因此，在统计上，费米子倾向于在所有能级中占据大量空间。质子、中子、电子、中微子等许多粒子都是费米子。

整数自旋的粒子称为**玻色子**。玻色子并不服从这条定律。如果可能的话，它们可以聚集成团。在这样的一个粒子餐馆中，它们能够享用同一张桌子，并邀请它们的玻色子同伴加入。因此，对于能级空间，它们倾向于占据最低的能级空间。这类社会成员包括光子和大量的各类介子。

费米子和玻色子在宇宙中扮演不同的角色。费米子是构成物质的基石，而玻色子是力的传播媒介，引起物质之间的相互吸引排斥，保持稳定或者衰变。

223

另外一种粒子分类是考虑它们受强相互作用影响的大小。一些粒子叫做**强子**，能够感受到强相互作用力。质子、中子、介子等许多粒子都归为此类。其他粒子，叫做**轻子**，完全察觉不到它们受强相互作用的影响。这类家族包括电子、中微子和 μ 介子。很明显，某些费米子是重子，另外一些是轻子。既属于费米子又是强子的粒子称为**重子**。

此种分类也反映出不同粒子的质量。一般说来，重子意味着“比较重的粒子”，体积最大。轻子，则是“较轻的粒子”，“轻量级”的粒子。介子的质量一般说来介于两者之间。最后，光子为零质量。

与这些分类一道还包括所谓的反粒子。它以狄拉克最先提出的一个概念为基础，大部分粒子都有相应反粒子。虽然相对应的粒子和反粒子质量和其他属性一样，不过它们还是有很多重要的区别。如果粒子带电，反粒子的电荷则相反。如果一个粒子和反粒子碰撞，它们就会互相湮灭，变成纯粹的能量。

通过检测到这些不同的粒子（和反粒子）并且注意到它们的衰变特征，物理学家觉察到特殊的守恒定律。他们发现无论发生什么，粒子的一些物理量不变。比如说，总的初始电量和最终电量一致。其他守恒量包括重子数守恒，轻子数守恒以及称为奇异性的属性。盖尔曼提出奇异数是用来解释为何特定类型的粒子产生衰变，其他却没有。

为了组织好这个粒子植物园，盖尔曼和以色列物理学家尼曼（Yuval Ne'eman）独立提出了一个系统将介子和重子以不同的多重态区分。这些多重态类似于同位旋对子，在汤川秀树的理论中，通过同位旋对，将质子和中子合到一起——通过加入奇异性进行扩展。介子自然地归于一组，而重子分为几个其他群。比如说，质子和中子属于八个粒子家族，还包括 λ 、两种 ξ 和三种 Σ 粒子。每一家族的特定属性相同，包括重子数、自旋以及近似的质量。盖尔曼亲切地按佛教的方式称这个命名系统为八重道。



这种方案揭示了一种特殊的对称性，它允许在一个给定的多重态下，一个粒子变换到另外一个粒子。就像杨和米尔斯认识到的质子和中子之间的变换可以通过一个 $SU(2)$ 群表示，盖尔曼和尼曼发现类似的同族交换可以通过 $SU(3)$ 实施。 $SU(3)$ 是一个三乘三的特殊矩阵群，尽管它最简单的表达允许实体和三重态之间的变换，它也可以以一个不同的表示作用于更高态。

事实上， $SU(3)$ 几乎可以简单用三重态表示，这让盖尔曼和茨威格找到另外一个突破点。他们发现重子都是由三个夸克和反夸克组成；而介子相反，都由正反夸克对组成，这个漂亮的事实可以以更为优美的方式划分粒子家族的所有成员。

按加州理工学院研究员的划分体系，人们可以用夸克的“味”描绘夸克自身。当然，这和味道没有任何关系，仅仅是一种奇特的区分方式。他们相信三种不同的味——称为上、下和奇异——将足够区分所有已知的强子。从那时开始，实验物理学家发现了许多新的强子，增加了三个已知的味：粲、顶、底。

夸克的另外一个属性是它们的“色”。强子必须有三个不同色的夸克，而介子要有两个。一个单独的 $SU(3)$ 群的作用可以通过交换胶子，把一种色变换到另外一种，而胶子通过反反复复的牵扯传递了强相互作用。从而，与成功的电磁理论 (QED) 类似，强作用力理论被称为量子色动力学 (QCD)。

打破对称

弱相互作用力曾经遇到类似的难题。20 世纪 50 年代后期到 20 世纪 60 年代初，对弱相互作用力的量子场论大概什么样子物理学家已经有所感觉，但是他们没有朝这方面工作。像施温格提出的最简单的模型，完全不能重整化。然后是谢尔登·格拉肖 (Sheldon Glashow)，他在施温格的指导下获得了理学博士学位，发展出一套新颖的方法，他用 $U(1)$ 和杨-米尔斯规范场的叉乘将电磁力和弱相互作用合并到一起。因为电磁场理论是一个规范理论，所以通过它可以想见弱力也是一个规范理论。此种糅合看上去非常有希望，特别是可以解决基本矛盾。为了保留它的数学对称性，杨-米尔斯方法只允许无质量的规范粒子。由此，如果这种方法可以用来解释弱力，物理学家就需要探测到新的无质量粒子，或者找到一条途径，不破坏规范粒子内在对称性而给予其质量。

225

第一种选择是不可能的；所有大量存在的无质量粒子都可以容易地探测到，并被人们熟知。在已知粒子中，只有光子和可能的中微子没有质量（我们现在知道中微子也具有微小的质量）。人们知道光子仅仅是电磁场力中的规范粒子，中微子不可能是规范粒子，因为它所有的性质都不对，比如它是一个费米子，非人们需要的玻色子。由此，在弱力中没有无质量的力的传递粒子的存在。

剩下的只有第二种选择：为交换玻色子赋予质量。1964 年，爱丁堡大学的希格斯 (Peter Higgs) 发现了一个聪明的



方法处理这个问题：自发对称破缺（spontaneous symmetry breaking）模型。人们发现一种对称性可能破缺为另一种对称性，这一方法便基于此。环境的改变可能突然导致相变，从一个完美的对称状态转换到有缺陷的对称状态。例如，人行道上的一块完全正方形的路砖，在寒冷一月中的某一天突然被冰冻，这就有可能在砖上面产生明显的裂纹，它的左右两边可能不再镜像对称，于是破坏了最初的对称关系。

为了建立自发对称破缺的条件，希格斯在杨-米尔斯方程中加入一个额外的场。这个希格斯场遍布整个宇宙，作用是改变环境温度。在宇宙早期的灼热环境中，希格斯场呈现出完美的规范自由度的状态，它内部空间可以形成任何组织状态。它的规范“指针”可以绕任何一个方向旋转，就像一个迅速转动的轮盘赌^①用的轮盘。但是，当宇宙冷却下来，希格斯场就会产生相变，转到不同的能态。在这个过程中，它将失去规范的自由度。它的指针只能被限制于单一的方向，如轮盘由于阻力而停住。

226 爱因斯坦指出，尽管能量无法被消灭，但是它可以转化成质量。在希格斯场相变过程中，它的指针失去旋转的能力，由此损失的能量将转化成一定的质量，这个质量将由正好出现的玻色子承担。因此，简而言之，空间冷却过程中，规范自由度的失去导致交换粒子的质量产生。

人们可以类比这个过程：有一水槽，一个圆形滑艇顺着平静的水面滑下，但尚未坠入陡峭的山间。假设滑艇投入水槽之

① 一种赌转动盘上旋转的小球将停止于盘上哪一个槽内的赌博游戏。

前，将其安稳地停于山顶。你无需过多考虑你的位置，因为滑艇是圆的，任何位置都是一样的。事实上，当平静的水温柔地使滑艇旋转，没有哪个方向更好或者更坏。这和完全规范对称状态类似。

但是，当小船开始惊心动魄地下坠，也即突然产生“相变”。转瞬间，水看上去朝着相同方向流动，这样便产生座位的优劣之分。当小船到达最底部，下降的动能转换为向四周溅开的巨大水花，也可以知道谁坐在最前面。那些位置靠后的没有怎么打湿的乘客打趣你浸湿的衣服，你离开船的时候也感觉比原来重了一点。船的圆形对称性的改变导致了你衣服重量的增加。和希格斯方法中的道理一样，一个完美的均等的状态自发地转变为一个有偏向的状态，能量的损失转化为质量的获得。

希格斯方法与格拉肖提议一道，给两个聪明的年轻物理学家提供了宽广的空间自由发挥。他们是伯克利的温伯格和皇家学院的萨拉姆，他们各自独立进行着这个工作。1967 年，温伯格和萨拉姆将弱相互作用粒子的物质场与希格斯场、光子以及三个新的 $SU(2)$ 规范场——称为 W^+ 、 W^- 、 Z^0 ——合并到一起，设计出一个成功的电磁力和弱相互作用力的统一理论。此次联姻，新婚夫妇共享电弱力的称呼。四种自然力中的两种最终统一，这是科学至高无上的成就。

这桩婚姻是否有效，或者是不是会遇到麻烦？许多物理学家采取“静观其变”的态度，直到对它的争论能够更加清晰明了。荷兰物理学家特胡夫特（Gerardus 't Hooft's）令人鼓舞地预测给他带来了好运，利用一项令人振奋的新技术 1971 年

227



他发现自发对称破缺的杨-米尔斯理论能够完全重整化，产生的任何无限项都可以消除。

此后不久，在靠近日内瓦的欧洲粒子物理研究所加速器工作的实验物理学家，确认了温伯格-萨拉姆模型的预测之一。理论的核心的 Z^0 规范场代表了一种新的类型的弱交换作用，这种作用并不影响参与作用的粒子的电荷。当模型提出来的时候，这样一种中性电流纯粹是理论预测，从没被发现。粒子物理研究所的研究人员最终检测出这样无电荷的交换，他们的发现证实了整个模型的正确性。弱规范粒子的最终探明为这幅图景画上最后一笔。

温伯格、萨拉姆和格拉肖的合作获得成功，不久后他们开始以他们的天才进一步统一自然力。1972年，和物理学家帕提（Jogesh Pati）一道，萨拉姆第一个试图统一电弱力和强相互作用力，他们的工作在一个被称为大统一理论（Grand Unified Theory, GUT）的框架下进行。他们将夸克和轻子归于一类，希望找到一个规范群能够将其相互转化。他们的预言包括质子有可能衰变为其他粒子，这是一个正在被检验的假设。格拉肖与他的学生也即未来同事乔吉（Howard Georgi）一起，进一步尝试寻找这种大统一。温伯格也在探索类似的可能性，沉思一个“终极理论”的性质。

所有的这些比赛如火如荼地展开，一时间，引力被冷落到一边。特胡夫特还有狄塞和他的博士后研究员纽文惠仁（Peter van Nieuwenhuizen）都证明，传统的量子引力无法产生重整化理论。由此，如果在公式的表达上没有重大改变的话，引力就还不可能加入到自然统一理论中的其他力中。不

过，引力的克拉克·肯特（Clark Kent）^① 将不得不寻求更有威力的工具，与无法消除的发散斗争。很快，超引力理论走出来，解救引力糟糕的处境。 228

终极理论

克莱因在斯德哥尔摩的最后年月中，对粒子物理保持浓厚的兴趣。他与狄塞等人一同探讨物理问题，希望跟上最新的进展，他自己也提出建议。例如，在盖尔曼的理论完善以前，他试图自己发展强子的构成原理，有一点类似于最后确定的SU(3)模型。他很自豪地帮助杨振宁和李政道获得诺贝尔奖，这主要是因为他们发现弱力违反了物理上已知的对称性，即宇称守恒这个结论成了弱电力统一至关重要的方面。来自粒子加速器的新发现源源不断地涌现，克莱因努力地尽可能跟随这个领域的潮流。

克莱因钟爱的另外一个方向是给大爆炸理论找到一个替代理论。他觉得创造世界的单一的瞬间太令人不安，于是试图作出更稳妥的解释。1962年，他和瑞典等离子物理学家阿尔文（Hannes Alfvén）合作，发展出一个基于物质-反物质湮灭的模型。即使微波背景辐射的发现强烈地支持大爆炸理论，但他依然坚持自己的理论。

随着克莱因日渐老去，他对知识的广泛追求看上去像一棵苍天大树不断伸展着枝丫。他在哲学、宗教和科学史领域做了

^① 即《超人》系列的男主角。



大量的报告，写了许多文章。他特别对于伽利略、帕斯卡和一位叫做乔当思·尼莫拉瑞厄思（Jordanus Nemorarius）的中世纪科学家的生平及工作情有独钟——关于后者，他曾经出版过非常受人尊敬的论文。他希望能够将科学问题展示给公众，于是他在瑞士广播电台谈话节目的声音为大众熟识。²⁶

克莱因老年出游很少，其中的一次是去国际理论物理中心（ICTP）；这是由萨拉姆在意大利的里雅斯特（Trieste）建立的。²²⁹ 访问是在1968年，这两位科学家因此亲密无间。尽管各自背景相距甚远，但是看上去他们也有很多的共同点。

萨拉姆非常钦佩克莱因的五维理论。他不像那个时候的大部分同事，他相信诸如克莱因的高维模型仍然可以与规范理论家发起的统一计划相抗衡。当他发展了一个自己的规范模型，他向克莱因描述并写道：“从克莱因教授做出了五维或者更高维数的时空对称到现在，链条上的最后一环才得以完成。”²⁷

除了他们共有的科学方面的兴趣，克莱因和萨拉姆同样具有强烈的人道主义精神，他们觉得帮助苦难之人是自己神圣的职责。纳粹统治期间，救助科学家同事重新定居让克莱因成为值得众人效仿的典范。萨拉姆类似地援助穷困的巴基斯坦学生，通过在国际理论物理中心设立奖学金，为他们找到有意义的工作。他也代表第三世界国家，为他们提高技术条件激烈地辩论。克莱因和萨拉姆都马不停蹄地为世界和平工作，寻求国际争端最好的解决办法。

1967年在中东爆发的六日之战令他们备受打击。战争的残忍且毫无意义的破坏让科技的发展倒退。他们在不同宗教之间斡旋，寻求方法向阿拉伯和以色列证明，求同存异对双方都

有好处。在的里雅斯特讨论了这些问题后，克莱因写信给萨拉姆谈有关下一步行动的可能性：“这几个星期里，关于我们在的里雅斯特的谈话我想了很多；特别是你提到的与以色列和埃及物理学家接触的可能性。可能这样的开端对于当前局势会有所帮助。”²⁸

直到20世纪70年代初，克莱因还依然活跃。那时，逐渐糟糕的身体状况让他无法在科学、哲学以及人道主义上都倾注所有的激情。心有余而力不足。

克莱因1977年2月5日逝世于斯德哥尔摩。终其一生他为自己的成就而自豪。他对物理的贡献广泛而重大，而他个人的热情、对知识的渴求以及全身心对他人的关心，在那些认识他的人的心头留下了永恒的记忆。

230

很遗憾，命运总是阻拦先知踏入他们自己的希望之乡。如果克莱因能够再多活几年，他就能见证卡鲁扎-克莱因理论的现代复兴；他也可以看到他的人道主义梦想成真——以色列和埃及签署和平协议；最后，他可以参加1979年诺贝尔颁奖仪式——纪念人们数十年来在统一方面的努力，他将会喜悦地看到，因为温伯格、萨拉姆和格拉肖的电弱模型，诺贝尔委员会把这一荣誉授予他们。

萨拉姆出席诺贝尔颁奖典礼的时候引起轰动。其他诺贝尔奖得主和观众都身着套装，而他却一身非西方价值观的打扮。他以前的学生密歇根的物理学家迈克尔·达夫（Michael Duff）描述道：“萨拉姆以传统服饰盛装出现：头戴饰以珠宝的穆斯林头巾、系着松垮的袋状裤、腰插着圆月形刀，还踩着令人惊叹的卷鞋，就好像他刚刚从《一千零一夜》的扉页踏出来。当



FIRST MOVER

第一推动

然，最后他把格拉肖和温伯格的风头抢得一干二净。”²⁹

萨拉姆的诺贝尔演讲内容，虽然以引经据典开始，但却以革命性的评论告终。描述电弱模型的发展历程后，萨拉姆提出他所认为的理论物理的未来：浮出水面的十一维超引力。他谈到法国物理学家奎姆（Eugene Cremmer）、朱利亚（Bernard Julia）、舍尔克（Joël Scherk）和其他人的工作。他表达了自己的希望——他们的高维模型可以囊括所有已知的场。萨拉姆提出，他们对“卡鲁扎-克莱因奇迹”的艺术般的处理，应该是条实现爱因斯坦伟大梦想的通途。

第 11 章 | 被弦紧束的超空间包裹

史蒂芬·温伯格，从得克萨斯归来
他带来的丰富维数，让我们迷茫
但是所有额外维数
都被卷进球中
它们如此微小，无法影响我们

——哈沃德·乔吉，粒子理论家¹

镜像的世界

超弦是现代科学思想史上最大胆的设想。从人们认定它的²³¹真实²³¹性开始，年复一年，试验从未证明其存在。加速器碰撞了不计其数的粒子，但碎片中没有发现任何超弦理论预言的伴粒子。而许许多多的物理学家觉得它那么激动人心，以至相信没有它世界将不复存在，他们坚持认为现今的加速器能量不够完成这份工作。没有任何物理理论能像超弦一样，凭借它自身在



数学上的美妙和内部的自洽，即使试验上几乎得不到任何支持，也能赢得大量的拥护者。

诸如格拉肖所做的评价，已经将信仰超对称与某种程度的宗教狂热相比较。“它只不过是一种抽象的优美，”他说，“我的许多朋友做超对称已经超过 20 个年头。这需要付出惊人的努力。而它确实是迷人的理论，天才的理论。毋庸置疑，它可以用来解释各种现象，万事万物……问题是没有一个预言的粒子被发现。”²

简要地说，超对称即费米子和玻色子之间的规范关系，类似于将质子和中子囊括起来的同位素自旋对称。超对称理论推断任何费米子都有玻色伴子，反之亦成立。在“超空间”中特殊的旋转给予费米子一半的自旋量，让它们受到激发后不再乖乖地服从泡利不相容原理，后者使得它按照量子能级严格分离。如此看来，每一个粒子都如同哲基尔医生^①，有自己的海德；仅仅通过变换才能让人们看到它的另外一张脸。比如，在超空间转动后，费米电子就变成了玻色子的“标量电子”（selectrons），同时玻色子的光子变成费米子的“光微子”（photinos）（加入前缀“s”或者后缀“ino”是科学家命名超对称伴子的方式）。

超对称于 20 世纪 70 年代初进入人们的视野，旨在挽救处于危险境地的强核力模型，称为强子的弦理论。它由芝加哥大学物理学家南部阳一郎等人发展出来，希望能通过无质量的弹性联结，描述质子、中子和其他强相互作用粒子的运动。用一

^① 英国小说《化身博士》的主人公。

维带状结构代替粒子，为一种更早的方法——双谐振理论提供了几何解释；这种理论是由欧洲粒子物理研究所的物理学家维内齐诺亚（Gabriele Veneziano）在 20 世纪 60 年代末提出来的。维内齐诺亚的模型用一个数学公式预言强子的行为；此时，基于振动学的弦理论，提供了一个更加直观的描述方式。弦理论从振动的不同模式中，导出了粒子性质，例如质量和自旋。

南部假设的一个缺点是它只能表示玻色子。玻色子的弦构建了各种联系，强相互作用费米子（夸克和反夸克）隶属于这种联系。费米子隶属方式就像在每股玻色子的绳子上系上哑铃。不过，没有任何有关费米子的模型。

另外一个问题与理论的维数有关。美国罗格斯大学的理论学家克劳德·洛夫莱斯（Claud Lovelace）证明玻色子弦只有在二十六维中才能在数学上自洽。几乎没有人相信这个疯狂的结论。

233

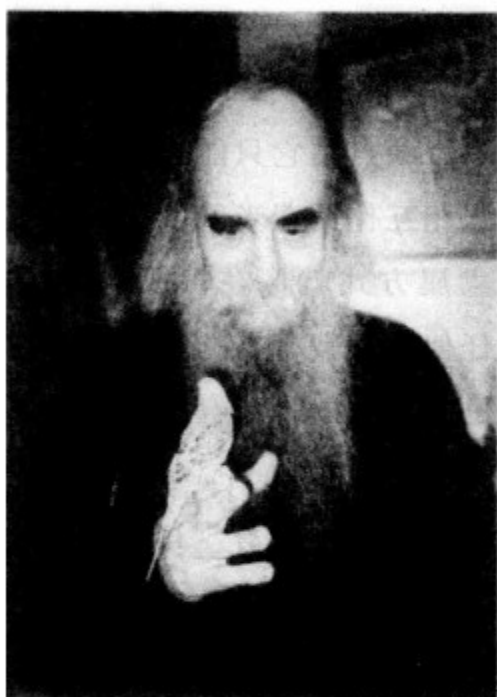
洛夫莱斯孩提时代就早熟，年仅 16 岁便读过爱因斯坦和狄拉克的著作，并试图构建他自己粗浅的统一场理论。他在萨拉姆门下获得学位，接着在欧洲粒子物理研究所的研究让他踏入强相互作用世界。他迷上弦模型，称为“超光速捷径”的比光速还快的结果让他们一头栽进计算的稿纸中。洛夫莱斯发现，为了避免这个伤脑筋的问题，只能将弦置于二十六维流形中。1971 年 1 月，他若无其事的在笔记上记着“我认为我们需要 24 个的类空（spacelike）和 2 个类时（timelike）的维数，才能完全消除（超光速的麻烦）。"³ 他仅仅在杂志不起眼的地方谈到这个发现。

物理学家偶然翻到这篇文章，非常吃惊地看到这个数字。



234

“洛夫莱斯的文章让每个人震惊，”加州理工学院的物理学家约翰·施瓦兹回忆道，“直到那个时候还没有人考虑过四维以外的时空维度。毕竟我们正在做强子物理，四维毫无疑问是正确的选择。”⁴



洛夫莱斯和他的宠物鸟儿在一起，他是二十六维弦理论的发现者。

据说洛夫莱斯“那个时候肯定没有意识到这个发现的重要性”。事实上，他认为这个想法很愚蠢。当他向其他物理学家描述二十六维结果的时候，他们一起愉快地欢笑。他回忆道：“当他在普林斯顿的一个研究班上提到它时，全场大笑。”⁵

1971年末，佛罗里达大学的物理学家皮埃尔·雷蒙德（Pierre Raymond）找到一个聪明的方法将费米子也纳入弦理论。玻色子通过不同的振动方式可以成为费米子。这个方法暗示，在玻色子和费米子之间具有很本质的对称性，两者之一可

以自由地变换到另外一种。由此，有必要扩展弦理论，将玻色子和费米子都囊括其中；为超对称的发展提供动力。此外，施瓦兹和南夫（André Neveu）证明，超弦（和超对称弦一个意思）仅仅需要十个维度，而非二十六个。尽管那个时代的大部分物理学家觉得十维也太奇怪，但是他们认为与更大的数目相比，这是一个实质性的进步。施瓦兹想在四维中找到可行的弦理论，却无功而返，最终接受十维是最小的可能维度。

强子弦理论没能长存。随着弱电模型的双成功——特胡夫特的重整化和中性电流的发现——物理界大体上承认强相互作用可以通过杨-米尔斯场形式的非阿贝尔规范群完美解释。看上去，解释这一组力的模型只需要一个，如果需要的话，对其修正，然后应用于其他力，这样才比较自然。由此，量子色动力学和其色荷丰富的 $SU(3)$ 变换成了分析强相互作用的标准方法。强子弦理论以及基于它的双谐振模型不久后就像 1905 年的斯多德巴克（Studebaker）^①，成了过时的东西。

像柴郡猫的微笑^②一样，当其他一切都逐渐淡去，超对称的吸引力依然如故。像流行于 20 世纪 70 年代的无处不在的阴阳符号一样，它的对立统一看来与时代相符。理论家想知道，是否存在某个方法将超对称纳入更标准的粒子模型——这一目标 1973 年由朱利安·韦斯（Julian Wess）和布鲁诺·朱米诺（Bruno Zumino）完成。

多亏这些物理学家的的工作，超对称才能以普通的量子场论

235

① 斯多德巴克（1831~1901）：美国制造商，1852 年创办的家族业成为世界上最大的马拉车制造业，后来生产汽车。

② 《爱丽丝奇遇记》的角色，常露齿嘻笑。



的语言表达：亦即，用描述粒子相互作用的动力学方程和费曼图表示超对称。如此改进，好比移民者从原来的国家溜走，在新地方换了一种语言。从此，每个人——不仅仅弦理论家——都可以讨论超对称。

引力如魔法

爱因斯坦逝世的 20 年内，几乎没人敢于接手统一引力和其他力的难题。即使在普林斯顿高等研究院，信念坚定的教授们孜孜不倦地意欲驯服这头怪兽，但在这场史诗般的斗争中也一无所获。年轻的研究员没有太多理由面对引力这巨兽，因为那个时候粒子动物园中有更容易被他们征服的不计其数的粒子。

1975 年，当施瓦兹在普林斯顿发表了一个鼓动人心的演讲后，一切都改变了。回到母校的他苦涩不已，因为许多年前，物理系拒绝给予他终身职位。他的思想对理论物理未来的发展至关重要；事实证明他们犯了一个多大的错误！

这场报告披露了超对称与引力之间的深刻关系，这是最近才由他和法国物理学家舍尔克一同发现的。在弦理论的框架下，他们发现光子自旋两倍的无质量奇特玻色子的秘密。因为这些新颖的玻色子没有已知粒子对应，许多弦理论家将其作为无意义的东西，不予考虑。舍尔克和施瓦兹意识到这些自旋为 2 的东西完全不是多余的；相反，他们就是引力的传递者，称为引力子。因此，引力子深藏于超对称的玻色子里面。

对于富于艺术气息的“地下丝绒”摇滚乐团，虽然鲜有人

买他们的唱片，但是每一位细细聆听过他们演唱的人都成立了各自的摇滚乐团。类似的，舍尔克和施瓦兹的发现最初无人关注，但是那些关心它的人，最终指引了理论物理的未来。这些认真对待他们发现的人中，有两个年轻热心的物理学家——朱利亚（Julia）威藤（Edward Witten）。他们为构造新的更高维统一理论贡献了力量。他们都提到这个发现如何影响其人生道路的，并让他们相信广义相对论是恢弘的自然原理的必然结论。

236

朱利亚 1952 年 7 月 8 日生于巴黎，他与众不同的计算能力伴他成长。最初他立志做一位数学家，不过最后他觉得“做物理更有用并更快出成果”⁶。培养出“对世界运行的基本机理的兴趣”后，他开始将非凡的天才用在群论和微分几何上，希望以此破译自然藏匿的密码。他的研究把他带到巴黎高等师范学院，接着到了法国奥赛大学，在那些地方他写过光学和弱电理论方面的文章。

在奥赛大学最值得朱利亚怀念的事，是与南夫、舍尔克和奎姆这些超对称的先驱见面，朱利亚最终成了他们合作的同事。奎姆是一个带着真诚笑脸的、安静的、热心的人，他和朱利亚都在巴黎生活过、爱好音乐。（奎姆热衷古典，而朱利亚酷爱演奏他的单簧管。）奎姆孩童时爱看大众科学杂志，由此爱上物理。

舍尔克与他差不多，温言软语，很友好；不过他有糖尿病病史和抑郁症。⁷正是得益于数学，让他从身心的困苦中超脱。

通过同奎姆、南夫和舍尔克的交流，朱利亚认识到在粒子



物理以外另有一片天地，一部振动的交响曲，甚至有可能是一切自然界的元素的大交响曲。朱利亚开始踏入弦模型领域，沉迷于超对称的种种可能性。

朱利亚在普林斯顿赢得一份工作，他将“超对称传染症”带到了美国。不久，他成了威藤的密友，威藤与之共享新发现的兴奋。朱利亚把舍尔克写的一篇评论文章交给威藤，在这篇文章中朱利亚觉察到费米子和玻色子的统一将为自然界相互作用提供更为可靠的基石。

威藤生于1951年8月26日，和朱利亚一样都是在美国生育高峰期出生。他在美国西北部少数民族聚居的郊区长大，他们是巴尔的摩的中产阶级，在莱文森（Barry Levinson）等制片人²³⁷的电影中对此有出色叙述。在那里，他形成了进步的政治观。他的父亲路易斯·威藤（Louis Witten）是一位引力物理学家，毕业于约翰·霍普金斯大学，成为辛辛那提大学的教授。

威藤长得瘦长瘦长，一头卷曲黑发，戴着厚厚的眼镜，举止腼腆，拥有一副温软的假嗓音。幼小的威藤完全是学校中典型的聪明学生。他的课堂表现异常优秀，因而连跳数级。因其天分出众，他被准予在所有课程中随意挑选。到了高中，他依然每个科目表现超群，简直不知道该如何选择。他不但在数学和物理上天赋禀异，在人文和社会科学上也让同辈刮目相看。“有一次当爱德华不在的时候，我们坐在一起，谈论他完全是世界上最聪明的人。”他以前一个同学回忆道。⁸

当威藤开始在布兰德斯大学学习时，他决定以历史为专业，立志成为政治新闻记者。他于1971年毕业，恰逢其时地

参加了乔治·麦戈文 (George McGovern) 失败的总统竞选。

不久，威藤意识到政治不是他内心真实的诉求，至少作为职业并不合适。他转变方向，决定在普林斯顿做研究。不过，他的一生对政治议程都热心关注，特别集中于巴以争端的解决。

238



爱德华·威藤，超弦与 M 理论最主要的物理学家之一。威藤继承爱因斯坦的传统，在高等研究院奋力追求自然所有相互作用力的统一理论。

在这个方面，他继承了爱因斯坦、克莱因、萨拉姆以及其他物理学家的传统，为国际和平奋斗。

当威藤来到覆满常春藤的校园，体验了巨大的文化冲突。普林斯顿与他习以为常的自由的、大城市气息的、民族多样化的生活背景迥然不同，这里非常传统。“威藤在普林斯顿感觉不合群，被孤立。”朱利亚回忆道，“曾经，在他压抑消极的时



候，我给过他一些小甜饼吃。”⁹

大约那个时候，朱利亚开始探索高维模型的可能。施瓦兹的讲话激励他尽可能地找到有关额外维数的一切，从中解答诸多问题。

巴格曼依然在普林斯顿，在这一方面，他是无法用价值衡量的知识的源泉。巴格曼给了朱利亚泡利的投影相对论的参考文献，并将自己对统一场的思考传承给朱利亚。学术生涯后期，他和泡利均相信高维理论靠不住¹⁰，巴格曼如是建议朱利亚。

不过，朱利亚还是想学习有关卡鲁扎-克莱因奇异世界的东西。在的里雅斯特的一次会议上，他涨红脸问狄拉克有关量子场理论额外维度的物理结论。狄拉克明显不快，指出现在考虑这个不合时宜。“可能以后”，他很不礼貌地简短答复。

当朱利亚在哈佛大学取得访问研究员职位后，他被邀请参加教员的一个正式午餐。他在那里找到场理论家西德尼·科尔曼（Sidney Coleman），再一次谈起狄拉克方程的第五维。西德尼·科尔曼张大嘴惊骇地看着他，回答“我对这个东西不负任何责任。”¹¹

威藤也来到哈佛，作为研究员在那里工作几年。他享受着追求知识的兴奋畅快的感觉，对统一的热情与日俱增，就像往炉子里面添煤，火焰越烧越旺。查拉拉·拿普（Chiara Nappi）来此做博士后工作，邂逅了这位年轻的物理学家并奇迹般地缓解了他的孤僻。他们结婚后，一同移居普林斯顿。他28岁就成为了物理系正教授，她则成为高等研究院的成员。在他的新工作中，威藤把一门课程变成对世界上最主要的理论

物理学家的质疑，他杰出的数学成就为他赢得了持续不断的赞扬。

同时，朱利亚对基本理论的研究让他成为物理最热门研究领域——超引力世界的主要研究者。他 1977 年回到巴黎高等师范学院，将他的才智倾注于探索超引力、量子理论和广义相对论的交叉学科中。

伟大的竞赛

一年前，超引力理论已经朝气蓬勃地发展起来。韦斯和朱米诺发现超对称可以合并到普通的量子场论，而舍尔克和施瓦兹解决了超对称中的引力问题，物理学家相互比赛，发展出第一个引力的超对称量子场论只是时间问题。不久，两个小组开始竞争超引力的奖杯。一个小组是纽约州立大学杨振宁负责的研究所，由纽文惠仁、富瑞德曼（Daniel Freedman）和费拉拉（Sergio Ferrara）领导。另外一组，位于欧洲粒子物理研究所，由狄塞和朱米诺领头。尽管这些竞争者之间有许多私人联系——纽文惠仁是狄塞以前的博士后同事，费拉拉与朱米诺在欧洲粒子物理研究所密切工作过——不过很令人伤感，竞争是残酷的。

这两个小组基本目标相同。诸如那些被费曼和施温格完善的标准场论，已经被证明无法胜任引力的量子化。事实一次次地表明——最后一次是 1974 年狄塞和冯·纽文惠仁发表的文章——引力无法重整化。“他和我进行了一个浩大的工程，我们最后一次决心将标准场论与不同种类的物质耦合，看有没有



可能消除广义相对论中的无项限。当然，奇迹没有发生。”狄塞叙述道。¹²

240 不像电磁场和弱相互作用，令人畏惧的发散看上去是量子化引力的致命伤，似乎没有任何方法可以避免发散。因此，量子引力项目，和伯格曼、德威特、狄拉克等人最初发起时的一样，依然濒临困境。超引力由于它是源于对称性原理的对引力的自然的定义，看上去是一处值得探索的、充满希望的前景。

就像 $SU(2)$ 和 $U(1)$ 群的联合对称破缺，可以将电弱理论以重整化形式表达，但它们的对称性发生对称破缺；超引力研究人员也希望对称破缺可以产生一个包括引力的重整化统一理论。他们希望超对称的破坏可以神奇地给出已知的基本物质的正确质量，同时能将光子和引力子等无质量的传递信息的粒子考虑进去。

“我喜欢把超对称看成拐杖”，朱利亚说，“它很有用，但你总想丢弃。你需要打破超对称，但是不能用蛮力。你想保留住一些好的特点。”¹³

利用希格斯机制强大的变换性质（用以支持“超希格斯”方法），两个竞争小组希望保留尽可能少的副产品（一些非本质的东西）时，创造了相似的场。他们希望，产生的粒子光谱与试验发现相吻合。

为了完成目标，两组人都面临挑战。那时超对称作为一种整体对称性被公式化，这意味着它对时空中所有点的操作都一样，像在一张画布上涂满均匀的红色。为了创建一种类似于杨-米尔斯场的规范理论，一种可以通过类似希格斯的方法产

生对称破缺的理论，他们需要让超对称局域化，就是说必须对时空中的每一个点都推导出特定的变换法则。就像艺术家乔治·修拉^①一样，在超对称的表示中，他们需要描画每个点，并找出细微的位置变化。这就使得超对称与广义相对论的爱因斯坦局域变量相符。

1976 年春天，经过许多个月痛苦不堪的计算，两个团队同时宣布成功，并将他们的结果发表于重要期刊，一场优劣之争立即展开。纽约州立大学的团队觉得对方的想法漏掉了别的一些群，而狄塞-巴黎高等师范学院的合作组深信他们结果和谐自治。²⁴¹

狄塞回忆，当时是凌晨四点，他从欧洲飞往波士顿；在航班上，他终于完成草稿的修改。他离开欧洲核子研究中心已经数周，他太需要好好休息一下。当他回来的时候，把文章放在巴黎高等师范学院的桌子上，让人发表。¹⁴即使他们和对方同时完成，但这让他们提交论文的时间略微晚了些。不过，后续关于超引力的大部分文章，同时引用了两个小组的结果。

最初的这些文章洋溢着希望的甜美味道，研究者叫嚷着要完成这个项目。有数不胜数的群和体系的组合需要探索，其中的任何一种都有可能打开自然的金库。一个详尽的研究开始了，旨在寻找正确的对称群与合适的维数，可以使超引力在数学的根基上和物理的精确性上得到统一。

^① 点描派的代表画家，点描派严禁混色，所有的颜料必须一小点一小点地维持原色并列地点在画布上，从而产生色彩混合的效果。



左岸的十一维生物^①

巴黎作家总有一个让人不快的兴趣，他们喜欢把目光放在塞纳河边不是那么引人注目的地方，以前贫困的拉丁区^②就成了—些神秘故事的写作背景。巴黎圣母院可怕的滴水嘴怪兽的目光不再穿过河流，凝视街道上的顽童、乞丐和一些不修边幅之人，而他们曾经走过的迷宫般的街道依然沐浴于光影中。雨果小说中的驼背不过老生常谈，真正的传奇正在上演，那是试验室中创造出的十一维生物。

万神殿（Pantheon）是巴黎左岸最富丽堂皇的建筑物之一，十一维便出生于这个被称为万神殿的经典拱顶建筑旁边。它黑暗的地下墓穴安葬了一些最伟大的法国哲学家、作家和科学家。地下的壁凹有一个便属于约瑟夫·路易斯·拉格朗日——四维的奠基人之一。生前，他激励着学生梦想着超越空间，到达其他维度；死后，他的灵魂还救助那些因高维领域困惑不堪的人们。据说，一些理论家曾经开玩笑地拜访拉格朗日的坟茔，向它寻求对—组特别困难的超引力方程的“启示”。

在万神殿的远方，是另外—些错综复杂的狭窄街道。向左转，然后右拐，人们可以看到—座造就诸多传奇的现代化建筑——巴黎高等师范学院的物理试验室。1978年，奎姆、朱

^① 左岸地区：巴黎的一个市区，位于塞纳河的南岸或左岸。长期以来以其艺术和反世俗陈规的气氛而闻名于世。

^② 拉丁区：巴黎的一个区域，位于塞纳河南岸。由于以巴黎大学为中心，几个世纪以来—直吸引着学生。

利亚和舍尔克在那里第一次琢磨出超引力，而超引力就栖息于十一维空间。

法国物理学家有许许多多的原因决定构建一个十一维模型。其他研究人员的计算表明，四维超引力重整化非常困难。此外，传统时空中的对称群操作无法在一把普适的大伞下，囊括所有的自然相互作用。对于完全的统一，一片更广阔的天地才有更多的机会。

奎姆和舍尔克在处理十维的弦模型上经验已非常丰富。1976 年，他们发展出一套称为“自发紧致”的程序，它可以利用修正的希格斯机制解释为何额外维数无法观测。

他们的模型包含一个相变过程，这将导致所有的物理场失去独立性——除了传统的四维时空。维度之间本来是平等的，但是转瞬间，大多数维数（十个中的六个）分离出来形成紧致空间。如果以卡鲁扎-克莱因的五维理论推测，这个紧致区域甚至要小于普朗克尺度（量子理论中的长度，是测量的最低限度），因而无法观测。²⁴³

为了利用这一机制，法国的研究人员试图构建一个超引力的十维形式，发生紧致后，超引力将分裂为强、电弱和引力相互作用的规范群。但是十维理论有一个标量场引出了问题，谁都没能解决这个难题，每个人都灰心丧气。最后，舍尔克问其他人，“要完成这个项目，我们该如何做呢？”¹⁵

答案是再加一个维度。这就有效地去掉了标量场，让模型行得通。奎姆指出，如果理论上需要的话（比如，为了与弦理论吻合），这可以相对简单地把十一维缩减为十维。

这个小组已经知道，德国物理学家韦尔纳·纳姆（Werner



FIRST MOVER

第一推动



巴黎高等师范学院的物理实验室。在巴黎的研究中心，奎姆、朱利亚和舍尔克发展了十一维超引力。

Nahm) 最近的计算结果表明，十一维将是一个可信的“万有理论”的绝对上限。超过十一维，无质量的场自旋将大于 2。因为自然界不存在这样的粒子，利用最大自旋为 2 的引力子人们可以排除许多维度的可能性。

即刻间，十一维形式几乎得到了所有四维超引力创建者的认可。“回顾当初，”狄塞反省道，“当我听说 26 和 10 时，觉得有一点好笑，但不是很过分，我牢记着 5。但是，超引力来了，十一被反复提及，它是完美的形式。”¹⁶

不过，施瓦兹也有理由认为十一维太多，他的英国物理学家迈克尔·格林 (Michael Green) 一起，寄希望于用超弦而
²⁴⁴ 不是超引力构建终极理论。“我必须承认 [当十一维超引力理论] 提出的时候，我有一点困惑，”施瓦兹评论，“我觉得超引力唯一值得研究的是低能下弦论产生的东西。不过，因为超弦

理论只允许十维，因此似乎没有 11 维超引力发挥的地方。我将其看成一个 10% 的误差。”¹⁷

数学娴熟的舍尔克继续做超弦和超引力阵营的双重间谍，致力于建立两者间的有机联系，使其更具活力。但是接着悲剧袭来。1980 年，舍尔克身患疾病，并被精神错觉折磨得抑郁不堪，在 35 岁的时候，突然去世。他死于药剂过量——非常像自杀。¹⁸看来，他内心的魔鬼远比他创造的十一维的存在更强大。他多年的同事施瓦兹、奎姆和朱利亚，对于他的逝去悲痛万分。

很多事情暗示了他英年早逝的悲剧，比如舍尔克悲伤地错失与同事参与构造十一维结果的讨论。不久，主流物理杂志成了人们熟练分析如何才能使十一维统一方法生效的领地，其中包括了弗洛伊德和罗宾两篇开创性的文章。

卷曲的空间

彼得·弗洛伊德生于罗马，他对卡鲁扎-克莱因理论的兴趣源于大学向人请教过的一个问题。1953 年，数学家佛朗希诺（Gheorghe Vranceanu）做了一次演讲，在笔记的过程中，弗洛伊德迷上了他的一段陈述：电磁场和引力将在五维中统一。弗洛伊德举手问演讲者，核力如何加入到这个物理图景中。佛朗希诺并没有给出答案，弗洛伊德提出增加维度以适应额外的相互作用，他热忱地提出，可能宇宙的维度是无穷的。¹⁹

弗洛伊德对额外维数的迷恋一直持续了几十年。在这个领



域，卡鲁扎-克莱因理论像粗麻布一样流行。接着，当这个大胆的假设即将活力迸发之时，就到了弗洛伊德留名之时。1975年，他和赵镛民（音译，Yong Min Cho）合作的文章说明了高维的、非阿贝尔规范群可以紧致，这是对德威特等人工作的引申。

5年后，弗洛伊德和他的学生罗宾（Mark A. Rubin）一道撞上头彩。他们决定性地证明了十一维理论只有通过两种方法紧致：要么七个维度收缩，留下四个大维度；或者四个维度收缩，留下七个大维度。根据我们的世界可以推断，前一种可能性成立。他们还给出别的成果，比如仅仅一个或者两个维度的坍塌完全不可能。

弗洛伊德和罗宾的发现是对巴黎高等师范学院小组的宇宙演化理论的有力验证。根据这个理论，宇宙起源时有十一个等价的维度，这个转瞬即逝的原初乐园中，包括所有已知场，相似的费米子和玻色子，完全平等地互相影响，彼此之间没有任何区别。这些对象之间的相互作用几乎同时发生，大小一样，没有任何隶属关系。

接着大坍塌来临。宇宙冷却到无法再维持完全平等的“高贵”状态。它经历了一个相变过程，呈现出真正的基态，但是人们证明这个状态下的宇宙并非完全均匀。与此同时，普通的四维时空依然膨胀，其余七个维度卷曲成一个紧致（封闭而且有界）的区域。这些微观区域比普朗克尺度还要小，那刻起就无法被观测。超对称开始坍塌，导致费米子和玻色子成为迥然不同的两种粒子。一段时间以后，其他的规范变换也发生破缺，最终造就了今天纷繁杂乱的粒子和宽广的作用力。

弗洛伊德和罗宾的文章出现不久，耶鲁大学的物理学家科多斯（Alan Chodos）和戴威勒（Steven Detweiler）就额外维度可以收缩为非常微小的部分提出一个完全不同的解释。他们的文章“第五个维度去了哪里？”很奇怪，完全没有引用十一维超引力的论文；因为这个理论如此之新，他们还没听说过。它没有回到原始的卡鲁扎-克莱因模型，而是巧妙地说明如何通过略微修改的大爆炸模型，将五维表示出来。

246

科多斯回忆起在约旦的那些日子。那时他和戴威勒把各自的想法合二为一，创造出第一个卡鲁扎-克莱因宇宙。“让我们真正开始出发的是戴威勒，他是广义相对论方面的专家，知道有关广义相对论中 Kasner 解的事情。这个解要追溯到和卡鲁扎几乎同时代的工作。Kasner 解是一个非常简单的，依赖时间的爱因斯坦方程的解。它从来没被人怎么用过，因为它预言一些维度会不断扩大，而另外一些随时间收缩。如果你只停留在四维，是无法完整理解这个过程的。但是，我们意识到它与一个五维体系吻合得很好。由此，这让我们饶有兴趣继续研究下去。”²⁰

换句话说，科多斯和戴威勒给我们展示了一个相当奇怪的大爆炸。这个模型中，奇特的几何结构规定，在大爆炸过程中，传统空间会膨胀，而其他空间则收缩成微小部分。这篇文章后，出现很多讨论，对这个可能发生的情景的多个方面进行修正；其中引用了弗洛伊德对超引力平易近人的处理，还有我在纽约州立大学作研究生的第一篇文章。我刚刚接触这个领域，发现科多斯和戴威勒的概念很有趣，可以简单地描述维度的减少。



科多斯要穷追到底。这次他与耶鲁大学的物理学家阿贝奎斯 (Thomas Appelquist) 合作, 用其他方法解释为什么一些维度比其他维度小。它依靠一个称为卡西米尔效应 (Casimir effect) 的量子现象, 来促使选择性收缩的发生。卡西米尔效应与一种吸引力有关, 这种力产生于真空的金属板之间。耶鲁大学的研究人员说明在紧致的第五维中, 这种效应是如何产生, 并让第五维收缩到普朗克尺度的。按科多斯的说法, 这篇文章比他和戴威勒的工作吸引了更多人的兴趣。他很自豪它吸引了温伯格等德高望重的物理学家的注意。那个时候, 温伯格、萨拉姆等标准粒子模型的开拓者都致力于统一化的卡鲁扎-克莱因理论的可行性研究。

手性的灾难

247

1981年初, 威藤即将步入30岁。这个年龄阶段, 一些理论物理学家和数学家都已经做出了他们最伟大的贡献 (例如黎曼)。在威藤才华横溢的人生中, 他仅仅点燃了火种, 这个火种已经燃烧了10年, 而且依然炽热。他思考多维流形的新奇几何, 寻找闪烁着微光的终极的真实, 作为普林斯顿的终身教授, 他享受着自由思索的快乐。

那个时候他的一篇文章《寻找事实的卡鲁扎-克莱因理论》证明了他对这个领域的担忧和对前景的深刻洞察。这篇文章是对这个领域的权威解释, 它基于历史, 但是向各个方面扩展, 包括一些即使是这种思想的原创者也无法想象的方面; 它向不熟悉卡鲁扎-克莱因理论的读者概述了到目前为止的所有进展。

威藤小心翼翼地 向巴格曼咨询，确保文章中的年代和时期的完全准确。

历史性的评述后，文章的内容正式开始。威藤问“具有 $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ 对称性的流形的最小维度是什么？”²¹ 也即，需要多少维度来适应量子色动力学（夸克、胶子和强相互作用的色交换原理）和温伯格-萨拉姆模型（关于电弱相互作用的场理论）。只有为每个变换群留出足够的空间来，才能与引力的时空对称性一同构建容纳所有自然相互作用的大厦。

威藤的质疑可以用将要订婚的一对新人打比方。他们订婚宴席需要计算一下，多大地方才容得下新娘子的家人朋友、新郎的家人朋友、他们的邻居、他们父母的邻居、筹办宴会的人等。只有这样，他们才能确定要租多大的餐馆。

威藤将每种对称群所需要的维度相加。 $U(1)$ ，表示沿着圆圈运动，只需要一维。 $SU(2)$ ，可以用沿着球面旋转概括，包含两维。最后是 $SU(3)$ ，可以用空间需要许多参数的变换表示，需要四个维度。把一、二、四加到一起，得到七。把这个与四维的时空联合，就得出最小值十一，刚好就是超引力的维度。加上纳姆的推断，即十一是**最大的可能维度**，可以说这个发现是奎姆、朱利亚和舍尔克理论极好的注解。他们的骰子投到了一个幸运数字。

对于这对将要结婚的新人，当他们知道预订餐馆的面积合适后，略感轻松。但是接着，当客人都离去，一个新的寻常的忧虑接踵而来——如何才能组建好一个新的家庭。类似的，当威藤解决维度数目的问题后，他提出一大堆更多技术上的难题，与玻色子手性（右旋或者左旋）、所有对称群的自发破缺、



不同的常数值等相关。这些问题中，他认为手性问题最困难。

手性的费米子与杨振宁和李政道赢得诺贝尔奖的发现有关——宇称性在考虑到弱相互作用时被破坏。宇称是右旋粒子和左旋粒子之间的对称性，它意味着，如果一种粒子存在，另外一种也必须存在。但是，自然界有种奇怪的粒子叫中微子，它属于费米子家族，只具有左旋（也即，相对于其运动方向，只有一个方向的自旋）；另外一组是反中微子，只存在右旋形式；而其他所有费米子（夸克、电子、 μ 介子等）都是成双成对出现，这好比左旋和右旋的螺丝钉互换方向。当格拉肖、温伯格和萨拉姆发展出标准弱电模型，他们将这种区分内建于理论中。如威藤揭示的，十一维超引力模型并没有把它考虑进去。宇称很显然守恒，所以这违反了众所周知的物理定律，为了在超引力中将其完全包括进去，必须对它进行一些修正从而可以让超引力理论区分手性。

249 这个问题类似于一个工程师设计了一个全新的分车道的高速公路系统，道路的每一边都允许行车。他修建了一个弯道，可以引导车辆从右单行道进入另一车道的左单行道。但是，它没有指定优先靠左还是靠右行驶。评论家立即痛斥他的方案，他们指出高速公路法规的“手性限制”决定了道路的任何一边都可以合法地行驶。他们提醒，他这样“无手性”的设置可能引起诸多交通事故。工程师现在才意识到这个问题，他必须修改他的系统，去掉单行道之间的直接连接，让车辆朝着相反方向前进。

这个模型由奎姆、朱利亚和舍尔克提出，优雅并且简单。它的维度数目似乎非常正确，但是，和一条允许单行道之间任

何可能的连接高速公路的系统一样，它太对称了。为了与说不清的自然偏见吻合，它需要区分左右。

当威藤打开满怀期望的水坝，其他重要问题源源不断地涌出。他在 1983 年和高密（Luis Alvarez-Gaumé）写的一篇文章提出高维度的超对称性理论在数学上有毛病，有一种称为异常的东西完全无法消除。这些毛病违背了能量守恒等物理原理，会得到奇怪的负几率。想象一下在一个特定的地方竟然有比零更小的几率是多么奇怪的事情。

更让人担忧的是，超引力的重整化远比想象的困难。一些最符合超对称需要的规范群似乎是不适合标准模型的错误类型。最后，一个比较棘手的问题宇宙常数（在广义相对论中，由爱因斯坦引入但最终抛弃的反引力项）大得不合理，而没有什么解决希望。

整个 20 世纪 80 年代初，超引力专家精力充沛地工作，试图解决这些困难。除了这个领域的创立者，世界各地许多年轻的研究人员都投入其中，那个时期致力于超引力研究的英国物理学家就包括达夫（萨拉姆以前的学生，还是狄塞的博士后助教）、吉本斯（Gary Gibbons）、韦斯特（Peter West）等人。这一领域的其他贡献者还包括比利时的翁格勒（François Englert），波兰的德威（Bernard de Wit），德国的尼古莱（Hermann Nicolai），意大利的达乌亚（Riccardo d'Auria）和福勒（Pietro Fré），瑞典的尼尔森（Bengt E. W. Nilsson），美国的波普（Christopher N. Pope），盖茨（S. James Gates Jr.）和西格尔（Warren Siegel）。

那个时候我是纽约州立大学的研究生，我为超引力研究人

250



员的努力和坚韧不拔的忍耐力而惊讶。假期、节日、晚间和周末没有任何区别，他们都游弋于无止境的费曼图的风景中。而冯·纽文惠仁作为团队的领导，似乎也是所有人中最刻苦工作的一位。在午夜看到他出现在理论物理研究所并不少见，刚刚参加完一个会议下飞机，又投入到别的任务中去。我记得一次他从家乡荷兰回来已是凌晨，他的口袋里只有荷兰盾没有美元。我借给他一些钱，他坚持要拿荷兰盾交换，第二天，我们换回去。考虑到在砖墙之内，人们的努力程度，我觉得我有权以我自己这个不足挂齿的方式，为大家共同的理想尽绵薄之力。

美好的振动

几乎整整十年，超引力的魅力吸引了若干最优秀的研究生、博士后和年轻的教授。即使有一些瑕疵出现，这些研究者仍然都对他们的玉石情有独钟，希望经过琢磨，可以令它重放光辉。

这个时期的超弦理论是超引力晦涩可怜的亲戚。尽管它为超对称的发展提供动力之源，不过它的基本主张没有什么创新。考虑到弱电模型明了的成功，场理论家不解为什么要为奇异的振动弦交换相似粒子？

人们不怎么支持超弦，以至它最初的发展者施瓦兹在加州理工学院工作多年只拿到一个非终身的职位。格林，另一位主要的贡献者，仍然是英格兰玛丽女王学院不知名的教授；那里对非主流理论更宽容些。

251 1984年，格林和施瓦兹把他们两人的思想汇聚到一起，

由此产生他们人生最伟大的突破。他们经过小心翼翼的计算，证明了十维的超弦理论至少有一种形式可以完全地摆脱异常。他们已经证明在他们的理论框架中，不存在无穷项，因而无需重整化。（没有无限项可以认为是因为弦是延伸的物体而不是无穷小的点，故不需要理论家处理除以零的计算。）这是两个相对于超引力的主要优点。当他们在阿斯彭（Aspen）的一次会议上宣布结果，听众看到他们面目一新的模型时目瞪口呆。就像没有见过世面的学生，为了正式舞会精心打扮一番变得漂漂亮亮，他们的理论顿时吸引了人们热切的目光。

威藤在普林斯顿迅速地重复了这个工作，他宣称对此强烈支持。作为公认的数学天才，他的热心认可不久吸引了许多著名的物理学家来到弦的世界。一方面盖尔曼称它是一个“美丽的理论”，并衷心的祝福；一方面温伯格扬言它只不过是“城镇中的游戏”。²²即使是盖尔曼，也觉得它是残羹冷炙。“十一维的超引力（哼！）”，盖尔曼在一次会议上说。²³第一次超弦革命由施瓦兹、格林和威藤领军，由此展开。（它现在被称为第一次革命，是为了与第二次革命 M 理论的推出对比。）

这个领域的新生力量很快熟悉了它的主要内容。在这个理论中，自然界的基石是振动的弦而不是点粒子。这些弦有两种基本性质：开或者闭，开弦像切成几段的细绳，每一段都有两个自由的终端，而闭弦更像橡皮筋，形成一个完整的环。

每个弦都难以想像的小（ 10^{-33} cm）——远比自然界已知的任何东西都小。超过 10^{33} 个弦才能排列成一英寸长。这个尺度如此之小，以至于如果把一个氢原子想象成银河系那么大，弦就如灰尘般微小。因此，现在还没有试验可以直接揭示像弦



一般小的粒子的性质。

252

弦让自然界产生了许许多多完全不同的性质。就像亨德里克斯 (Jimi Hendrix)^① 弹奏出来的风格迥异的旋律。无论何时，当乐手拨动吉他弦，它只能以一个固定的谐振频率振动——基频的整数倍。振动类型要么是一个峰，要么是两个峰、三个峰；或者，一般地说，可以是任何整数峰。因为琴弦的两端已经固定，所以分数倍的峰是绝对不允许的。音乐中，就产生了截然不同的声音；物理中，就导致了分离的能级。德布罗意把这个音乐赋予电子围绕原子运动，成功地对其进行了量子描述。如今，弦理论提出电子（或者其他粒子），本身也是由许许多多的更小的振动组成。

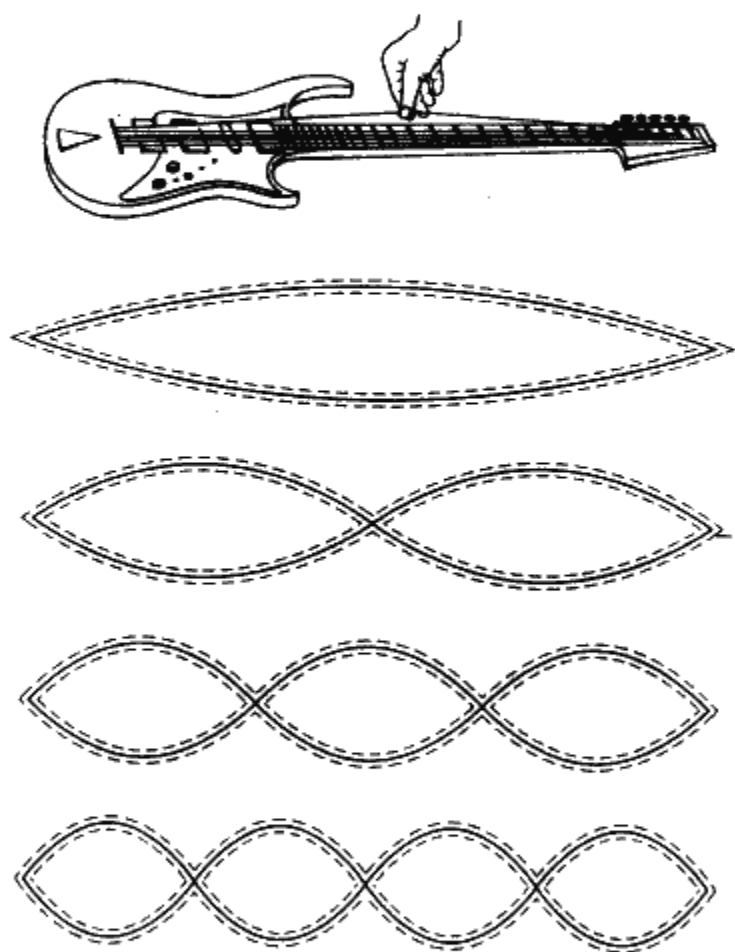
弦模型中基本粒子的每一个基本属性——比如质量、电荷、自旋等，就对应于弦的不同振动和配置。相同的弦，以不同的方式振动，可以产生完全不同的粒子。比如说，质量很大的 μ 介子通过比电子更高频率的弦的振动构成。玻色子和费米子都以各自的方式振动。因为弦振动的方式无穷无尽，由此它们可能产生出任何自然界中的已知粒子，也包括永远都看不见的粒子。

与吉他调音类似，调整一个称为弦张力的参数可以控制振动的范围。张力越大，弦越难振动。这就为振动创造了更多的能量模式，产生更紧密排列的波形。

不过，超弦与吉他弦的主要不同（当然，大小除外）之处

^① 亨德里克斯·基米 (1942~1970)，美国音乐家，经他改新的电吉他对摇滚乐的发展有重大影响。

是超弦可以自由移动。实际上，它们具有更多的运动方向，因为它们存在于更高维度空间。就像扩展的时空图记录的，弦的运动描绘出一张张的“世界薄片”：这些薄片概括了粒子路径。世界薄片表现得就像窗帘或者管道，随着时间的演化一股一股的摆动。



拨动吉他弦产生了一定形式的驻波，每种形式的波都具有整数个峰。超弦理论包含的振动的弦过于微小，因而无法检测，它的每种振动样式对应截然不同的粒子属性。



弦可以通过许多途径合并或者分离，这些短时间的相互作用与粒子碰撞和衰变的意义一样，在弦的费曼图中，这些行为所呈现的就是世界薄片随着时间的连接或者分离。弦理论家们试图用这样一些工具建立模型说明弦之间如何相互作用，以求使这样的描绘吻合自然过程。



萨拉姆，电弱规范理论的共同发展者，他自豪地看着施瓦兹。作为超弦理论的共同奠基人，施瓦兹正在展示他的狄拉克奖章。

253

超弦理论的主要发展者因为他们的成就获得无数荣誉。施瓦兹最终在加州理工学院被授予终身教授——这时距普林斯顿拒绝给予他这份荣耀已经12年有余。1988年当备受尊敬的物理学家费曼去世后，他搬进了费曼的办公室，1989年，国际

理论物理中心授予格林和施瓦兹名声卓著的狄拉克奖。四年以后，格林在剑桥大学获得教授这份受人尊敬的职位。威藤在 1985 年获得狄拉克奖，1990 年获得菲尔兹奖——相当于数学家的诺贝尔奖，以及许多其他荣誉。麦克阿瑟基金早在 1982 年授予他天才奖，施瓦兹 1987 年也得到同样的奖赏。 254

尴尬的财富

一年之内，格林和施瓦兹都发表了他们关于异常-自由超弦的论文，别的一些物理学家也发现了一大群可行的模型。这些模型，都基于一组不同的对称性，各自的性质不同。不久，研究人员将范围缩小到五个，这五种不同的弦理论称为类型 I、类型 II A、类型 II B、杂化 O 和杂化 E。类型 I 是最初的模型，包含了开弦和闭弦，其他模型仅仅允许闭弦。类型 II A 为非手性的；其他所有的都存在手性的区分。 255

杂化弦理论的四个发现者在威藤的小组工作，他们分别是戴维·格罗斯 (David Gross)、杰弗里·哈维 (Jeffrey Harvey)、马特尼克·伊米尔 (Emil Martinec) 和莱恩·欧姆 (Ryan Rohm)。他们被恰如其分地称为普林斯顿弦论四人。他们共同找到了一个天才的方法，将单个的弦理论合为一体，形成一个更加协调的体系。

单词“杂化” (heterotic) 是生物中一种过时的用法。它说明杂交后的后代比父母质量更高。对于弦理论，这个名称表示超对称理论与纯粹玻色子理论的合并产生了比两者之和更强大的体系。



对于闭弦，波既可以顺时针也可以逆时针沿着环传播。这两个可能的方向使得它成为一个具有手性的理论，与自然界对左手右手的区分一致。就像是沿着两个同心环跳的乡村舞蹈：男人以一个方向转圈，女人朝相反方向转。把男人换成十维空间中的超对称弦，而女人换成二十六维空间中的玻色子弦，人们就可以想象出由普林斯顿弦论四子指挥的美妙的乡间音乐场景。

为了让“舞伴”能够和谐地配合，玻色子弦必须在它的二十六维中隐藏十六个维数。这些额外的维数必须卷曲成紧致空间。尽管额外空间非常微小，但是它可以承载类型丰富的对称。引人注目的是如普林斯顿研究人员发现的额外空间包含了足够多的规范场（每一个场对应于一种特定的对称性），可以表示粒子的标准模型——甚至还有很多富余。

同时，威藤和得克萨斯大学的坎德拉斯（Philip Candelas）同加州理工学院圣巴巴拉分校的霍洛维兹（Gary Horowitz）和斯特罗明格（Andrew Strominger）发现了使弦理论中维数卷曲的合适的几何分类。它不像奥斯卡·克莱因模型把额外维数想象成一个圆，也不像卡鲁扎-克莱因理论高维的一般化图景中被压扁的超球面和超圆环，超弦理论采取了一种更加与众不同的设计。研究人员发现，将超弦理论十维中的六个维数紧致的正确方法，需要一种像脆饼干状的卡拉比-丘空间，它以宾夕法尼亚大学的数学家尤金尼奥·卡拉比（Eugenio Calabi）和哈佛大学数学家丘成桐命名。这种形状有数万种变化存在，每一种变化都卷曲成与自身截然不同的形状，就像加

州粗糙的约书亚树 (Joshua trees)^①。这种特殊的拓扑形状被命名为卡拉比-丘流形，特别是它的孔的数目控制了它表示的物理模型的对称性和其他性质。

五个可行的超弦理论都包含了数以千计的规范场，以及数以万计的让这些模型紧致的方法。得益于此，超弦理论家陶醉于超弦在数学上丰富的可能，他们希望不久后，一些科学的约束条件可以把这些选择缩减至一个“万有理论”。

不过，到了 20 世纪 80 年代末，没有一个模型被剔除；大量可能性的存在反而成了人们最大的尴尬。自然界需要一个单一的理论描述，而不是过多的难以区分的可能性。此外，没有实验的证据支持其中的任何一种理论——更别说整个的超对称理论，许多预言的粒子完全检测不到。诸如格拉肖等人的质疑慢慢变成批评，他们迫切要求理论界保持克制，不要把所有鸡蛋都往一个如卡拉比-丘形状的篮子里装。在一个统一理论的会议上，他读了一首诗，以下列几行结尾：

万有理论你胆敢莽撞而行，
也许一些东西不单是弦的轨形。
当你的一些主人顽固老迈，
事物的变异不再完全值得信赖，
请相信你并非深受打击之人，
书未完最后一个单词不是威藤。²⁴

① 一种分枝乔木状短叶丝兰，常高达 25 英尺。



费曼在他的最后一次采访中，表达了他的观点即超弦理论纯属无稽之谈。“我年轻的时候就已经注意到这个领域的一些老人不能很好地理解新的观点……比如爱因斯坦无法接受量子力学”，费曼说，“我现在也是一个老头子，一些新的观点，我看来也觉得疯狂。看上去，他们走错了方向。”²⁵

257

大约那个时候，圈理论作为引力的量子形式的另外一种理论，在锡拉丘兹大量发展起来。它并不需要相信振动的弦、超对称粒子或者额外维数的坍塌，仅仅需要以一种崭新的视角看待广义相对论本身。

超越几何

伯格曼掌管锡拉丘兹的相对论小组的几十年，他每周往返于锡拉丘兹和曼哈顿的上西区附近。一开始坐火车，以后乘飞机。如果乘铁路，旅途时间非常长；火车首先要在哈得孙河沿岸所有的重要城镇停留，接着是莫霍克(Mohawk)地区的所有城市，当火车徐徐驶进锡拉丘兹车站，一天所剩无几。一些人或许抱怨拖沓的往返，不过伯格曼在这段充裕的时间中，可以尽情享受阅读和思考的快感。此外，无论火车头奔向哪个方向，都值得他如此等待；一端是他聪明的同事和学生，另一端是心爱的玛戈特和他们两个孩子灿烂的笑脸。

1979年的爱因斯坦诞辰百年纪念和1982年他正式退休反映出伯格曼学术生涯的旅途。他出席了所有重要的爱因斯坦纪念会，追忆他们在五维统一场论上的共同工作。他谈到这个领域后来在量子引力的进展，并推测未来的发展方向。

尽管伯格曼和锡拉丘兹的小组对超引力（和超弦）甚为好奇，甚至在这方面也撰写了一些文章；不过，他们不愿意扑向这辆加速行驶的马车。他们的方法强调在量子引力方面一步一步推进式的发展，每一步都立足于对爱因斯坦理论新的理解。就像火车驶向这座城市沿途经过的所有站点一样，他们把量子引力的发展看成一系列的里程碑——从罗森菲尔德、伯格曼、狄拉克早期工作到 ADM 方法、惠勒-德威特方程、卷曲时空的场论到广义相对论中的旋量公式，等等。终极目标是找到广义相对论和量子理论能够对话的共同基石，但实际上，这将是条漫漫长路。 258

伯格曼强调，它们汇合的地点不再是时空本身，甚至也不是能够测量物理距离的几何。伯格曼喜欢引申爱因斯坦的话，他曾经说过人们不应该“自认为距离是不同于其他物理量的一种特殊的存在”。换句话说，人们不应该“把物理简化为几何”。²⁶

伯格曼退休后在纽约大学任职，他的朋友夏金热情地为他安排了办公的地方。而锡拉丘兹的小组继续坚持伯格曼的哲学观，试图寻找不以度规（规则表，用来指明时空位置之间的距离）为基础的广义相对论的描述。他们觉得，时空距离应该屈从于更适合在量子理论中操作的物理量。

1986 年，物理学家森（Amitaba Sen）和阿斯特卡（Abhay Ashtekar）基于广义相对论的基本联络（connections），而不是时空结构，发展出一个广义相对论的新颖的公式。在标准广义相对论中，联络表明时空曲率如何矢量地平行传输（沿着两个不同的路径，相互平行的运动），就像我们在



第四章考虑的 Marius 和 Darius 各自走向北极的例子一样。在森-阿斯特卡的公式中，一种特殊的联络成为基本的物理变量，这让爱因斯坦的方程更易于量子化。联络具有和 $SU(2)$ 非阿贝尔规范群类似的性质，因此这种重新的公式化表示让广义相对论成为与杨-米尔斯相似的理论。

利用这个新的公式，耶鲁大学的物理学家斯莫林（Lee Smolin）和罗威利（Carlo Rovelli）开始寻找量子引力的惠勒-德威特方程的解。在他们的工作之前，几乎没有人找出这个方程的解，以致于一些研究人员就把这种方法称为死胡同。让人眼前为之一亮的是，斯莫林和罗威利发现他们可以利用圈系统——与联络相关的物理概念，解这个方程。

斯莫林接着来到锡拉丘兹继续工作，他加入了一个新的小组“圈理论”，一个由阿斯特卡为首的相对论学者小组。在成为匹兹堡大学（University of Pittsburgh）的教授之前，罗威利在这个组度过了很长时间。锡拉丘兹的合作者们拓展了圈公式，它可以对相对论进行微观量子描述，表明宇宙是如何从泡沫状的积木状态开始变化的。他们的模型实现了惠勒的一个早期观点，即在量子尺度上，几何结构像泡沫一样，就如暴风雨下的大海。它也将伯格曼的目标推进一步：把物理从特定的时空概念中分离出来。

圈小组的工作赢得了别人一致赞誉，于是研究扩大到其他院所。1994年，阿斯特卡成为宾夕法尼亚州立大学新成立的引力物理和几何学的主任，他将斯莫林也带了过去。接着到了2001年，斯莫林被任命为加拿大沃特卢圆周理论研究院的领导。

人生后期，伯格曼抱着浓厚的兴趣紧紧追随着量子引力的这些发展，并尽自己所能参与其中。玛戈特去世后，他的健康每况愈下。他们已经做了 65 年最好的朋友，一同度过从德国黑森林到纽约河畔河滨公园的生命之旅。

2002 年，就在伯格曼逝世之前，因为在引力物理方面的贡献，美国物理协会无可争议地授予他和惠勒爱因斯坦奖章。惠勒致电伯格曼儿子家——伯格曼正住在那里，表达衷心的祝贺。令人伤心的是，伯格曼没有办法知道惠勒对他的真诚了。

动态对偶性

对一个局外人来说，20 世纪最后 10 年，最主要的两个模型——弦理论和圈理论——听起来异乎寻常的相似。毕竟，两个理论都声称包含细微的、一维弦的引力模型。

但是在基本层面上，这两个模型区别显著。弦理论试图成为一个“万有理论”，将引力与它的同胞们统一。而圈理论没有这样的要求，它只是一个专门的方法，把广义相对论打碎成小片，让量子理论可以处理。

此外，弦理论是一个卡鲁扎-克莱因理论，不过仅仅在更高维领域有效。它所推测的粒子和对称性，实验物理学家努力检测依旧徒劳无功。而圈理论，是对爱因斯坦标准四维方法的聪明的改写。因此不论好坏，它不存在过多的虚构的想象。

最后，弦理论依赖微扰的方法计算物理量。这要考虑将特殊的费曼图累加，要让这些技术行得通，人们必须假设相互作用



用能相对低。而圈理论相反，它是一个非微扰模型，特别是可以应用于高能量，比如早期宇宙那样的环境，它的低能限制完全来自广义相对论本身。

纵观理论物理历史，不同的问题可以采取微扰或者非微扰方法。当方程的精确解很难或者无法得到的时候，物理学家经常会使用微扰方法：首先以一个比较简单的解为基础，然后一步一步，进行一系列逼近精确的近似。

例如，假设人们希望估计一棵树的体积。他可以首先测量树干的宽和高，以此近似估计，这就提供了一个合理的猜测解。接着人们可以把主要树枝的大概体积加上，然后是比较小的树枝的体积，如此类推。通过微扰方法，人们最终能逼近正确答案。

而非微扰技术利用物理和数学原理，找到问题精确的解。在这个过程中，人们经常会利用系统固有的对称性或者守恒定律简化复杂的系统方程。比如说，非微扰的方法确定一棵树的体积，我们可以将它连根拔起，然后完全淹没于水中（把它压下去），接着计算溢出的水的体积。按照物理定律，这个量与水的体积应当相等。不过，如果树很大的话，这种说法说着容易做起来难。

在 20 世纪 80 年代到 90 年代，一个基于弦理论非微扰方法逐渐浮现。这个新颖的方法不仅考虑一维弦，同样考虑二维和高维对象——比如在十一维宇宙中振动的膜。这些松软的膜彼此有特殊的关系，也与一维弦有关系，它由特定的数学定律所控制。因为这些定律是精确的，因此可以对超弦世界进行统一、有次序的量度。

粒子应该看成膜而不是点的基本观点要追溯到 20 世纪 60 年代费曼的建议。直到 20 世纪 80 年代，弦理论开始流行，也几乎没有人听说过费曼的建议。然后，当一维对象开始风行，考虑二维和高维的声音越来越大。（人们必须小心地区分物体的维数和空间维数的关系；它们通常是不一样的。）

1986 年，突破终于到来。得克萨斯大学的研究人员休斯（James Hughes）、刘军（音译，Jun Liu）和泡耳钦斯基（Joseph Polchinski）做出第一个拓展物体的超对称理论。这些超对称膜——按照他们的称呼，具有多维形状，不断地振动，物理行为就像玻色子和费米子。接着 1987 年，格罗宁根大学的伯格肖夫（Eric Bergshoeff），国际理论物理中心的修森（Ergin Sezgin）和剑桥大学的唐森德（Paul Townsend）设计一个具有超引力特征的双膜（二维的超对称膜）在十一维宇宙中的摆动摇晃的模型。唐森德命名为 p 维膜，在这里 p 代表任意一个维度，以 p 膜简称。

同年，英国物理学家达夫、豪（Paul Howe）和斯特勒（Kellogg Stelle）与日本物理学家稻见武夫（Takeo Inami）证明，双膜像一个圆环一样紧紧卷曲到一起，就像围绕一根管子的纸巾，它具有类似于超弦的性质，实际上，在十一维中的双膜就像在十维中的弦。所有的这些结果暗示膜理论、弦理论和超引力之间的紧密联系。

大约也在这个时候，达夫、唐森德等人发现不同的膜和弦模型中明显的对偶性。对偶性是理论物理中的一种性质，改变不同的参数可以产生类似的结果，它可以在性质极为不同的模型之间建立联系。



比如说，一个 5 岁的小孩和一位 95 岁的老人来到电影院排队买票，一个 50 岁的人站在他们的后面，发现他们都可以买半价票但他不行。我们可以认为，在低龄与高龄之间存在一种对偶性，可以让他们都在打折的范围内，而中间的年龄段就没这权利。

比如，达夫说明一点对偶性给出了一维弦和五维膜的联系。这种对偶性只需通过交换场方程中电场和磁场部分的维数实现。接着到了 1990 年，斯特罗明格证明五维膜可以作为具有体积的弱弦（弱，是说与其他弦的相互作用弱）的伴子，从杂化弦方程中衍生出来。反正，在高维的海滩上，每一个“瘦小的”一维物体都与一个有质量的五维物体同时出现——可能是为了避免超空间的沙子打到脸上。此外，对偶性给出了一个非常合理的形式，即弦越“瘦弱”，五维膜越“强壮”，而且反之亦成立，这让不断膨胀的弦与它们天才的保镖完美地搭配。这些关系给出了一个更加明显的证据，即弦与膜的命运纠葛在一起。

不过，如达夫叙述的，那个时候大部分弦理论家对膜理论不理不睬。“我认识的一个弦理论家，只要听到‘膜’这个词，真的就捂上自己的耳朵。”达夫说。“实际上我曾经责备我保守的弦理论的同事们，因为对 M 这个词，他们一无所知。”²⁷

威藤是因为弦理论而受人尊敬。就像他对弦理论的祝福一样，膜理论也需要这样的物理学家的认可，以得到人们的接受。确定无疑的对偶性关系使威藤相信，所有的五个弦模型都可以在膜这张大伞下统一，他毫不犹豫地把这个美妙的单词传播开去。

一切理论之母

1995 年 2 月，在南加州理工学院的超弦会议上，威藤满脸兴奋地登上讲台。他公布了一种新的统一方法，他给它起了一个名字叫“M 理论”，这就是家喻户晓的第二次超弦革命。²⁵³他总结达夫、唐森德、斯特罗明格等人的工作，发现一个方法可以将所有已知的类型的弦统一到一起。它们不再是五个相互竞争的模型；现在它们成了一个模型。

威藤通过两种不同的对偶性：S 对偶性和 T 对偶性，稳步推进五种类型的弦之间的联系。S 对偶性基于物理学家蒙台恩（Claus Montonen）和奥利夫（David Olive）的推测，由森（Ashoke Sen）等人进一步发展而来，用它把强弱耦合常数（表征相互作用力）交换。而 T 对偶性来自早期的超弦计算，与一个巨大的紧致半径替代小的紧致半径有关，即它把克莱因的微小的圆环放大到宇宙尺度。把它们综合进“对偶性的二重性”中，这些变换就可以不可思议地把一类弦变成与另一类相似的弦——即使只存在闭弦的理论也可转化为开闭弦混合的理论。

威藤解释“M 理论”这个词的时候，异乎寻常地让人难以捉摸。他说，“‘M’代表‘不可思议的，神奇的’、‘神秘的’或者‘膜’，完全依个人喜好。”马上有人插话说它表示“一切理论之母”（Mother of All Theories），达夫很失望威藤没有直截了当地称其为“膜理论”，回想起弦领域的人漠视他和他的同事的那些日子，他觉得如此暧昧的称呼也是意料之



中，“当前的理论命名为 M 理论而不是膜理论，应该看成比鲁斯王的某种胜利。^①”达夫提到。²⁸

M 理论的优美震惊了每一个人，甚至包括那些在膜理论与弦理论冲突时还置身事外的人。它在观念上的统一和非微扰的解释吸引了许多人，他们曾经由于原始的超弦模型的冗繁和近似而放弃了这个理论。许多圈理论家羡慕 M 理论严格精确的结果，重新确定目标，把它和圈量子引力统一，以此可以解释所有尺度下的引力。研究超引力的人非常高兴，因为 M 理论的低能极限被证明就是十一维的超引力，他们觉得新模型为他们对十一维方法的执著讨回公道。即使格拉肖也承认，在这个时期，弦物理界和膜物理界取得的进展比规范理论家要多。

264

1996 年，威藤和普林斯顿的博士后培特·霍拉瓦（Petr Horava）在一篇文章中令人赞叹地做出了 M 理论的拓扑图，特别是关于杂化 E 类弦。就像高保真音响爱好者急切地想测试新的音箱，霍拉瓦和威藤慢慢增加了弦耦合常数的值，当他们把它调得越来越大的时候，令人惊叹的事情在弦上发生了。从对偶性的联合开始，弦越变越厚，不是沿着弦所在空间的方向，而是朝着一个额外维数扩展，它进化为一个二维膜。这个结果就像正方形从他生存的“平地”缓缓升起，突然发现一个高维的全新的世界！

霍拉瓦和威藤新颖的拓扑图不久赢得了迷人的名字——“膜世界”，这个名字源自他们模型独特的景观。普林斯顿的研

^① 付出极大牺牲而得到的胜利（比鲁斯在公元前 280～前 279 年打败了罗马军队，但牺牲极大）。

究人员发现，他们的宇宙蓝图可以巧妙地依次分成三个截然不同的空间区域。首先，存在一个普通的三维空间，他们将其重命名为“三维膜”；接着，由对偶性原理产生了一个额外的维数，由于三维膜的限制，它产生于四维空间，称为“圈”空间。最后，存在一个六维的紧致区域，它形成一个微小的卡拉比-丘形状，并以无法得知的形式纠缠到一起，这个卡拉比-丘区域把标准粒子的对称性雪藏。由此，总共有十个空间维度：四个维数的大空间和六个维数的细微空间，再把时间加上，霍拉瓦和威顿给出了十一维的“膜世界”的路线图。

让人好奇的是，闭弦和开弦进入这个宇宙的级别不同。闭弦可以在任何地方自由往来，包括“圈”空间，而开弦的末端则被限制于相同的三维膜中。因此，开弦比闭弦少一个自由度，它们的动力学性质明显不同。

开弦的这种局限由泡耳钦斯基发现，他利用 T 对偶性的巨大威力证明开弦和所谓的 Dirichlet 膜（简而言之，叫 D 膜）具有共生关系。就像树袋熊和桉树，人们找到其中一个，就会发现另外一个。因此，霍拉瓦-威藤模型中的三维膜就是三维 D 膜的一个例子，开弦附着于它，而闭弦自由地到处闲逛。

265

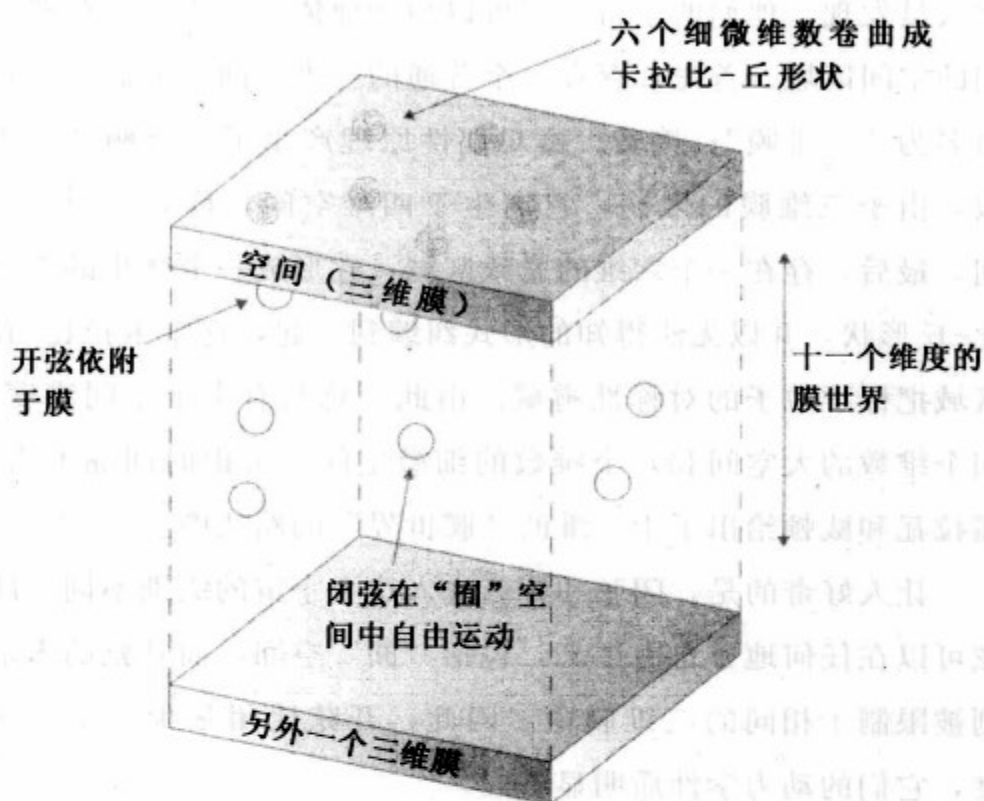
引力子，即引力的载体可以用闭弦模型化地表示。W 玻色子、Z 玻色子、光子和胶子等自然力的载体，都可以用开弦表示。这就说明了开弦和闭弦的不同，也很好解释了长期以来的谜团：为什么引力比其他力要弱得多？

不久，研究者开始比赛发展难以置信的膜世界，一个可以提供物理的、真实的描述各种范围内相互作用的世界。因为这些世界有额外的非紧致维数，研究人员意识到，这个附加的特

266



FIRST MOVER 第一推动



这里描绘的是一幅十一维膜世界图景。在这个“三明治”中的一个膜里，包含了传统的空间维度，这是一个 Dirichlet 膜，或者叫做“D 膜”，亦即开弦依附于它，无法逃逸。额外空间维数中，有六个维数卷曲成微小的卡拉比-丘形状，除时间之外，还剩下一个额外维度，它可能大到可以检测。只有引力子，因为它是开弦，故可以自由地在这个额外维度中穿梭，可以穿越下面的区域，称为“圈”空间。

点甚至有可能被检测出来。当实验物理学家细细品味检验额外维数可能性的时候，理论家们固执地确信他们的模型与合理的推测吻合。通过对不同物理和数学参数的调整，他们开始设计一个适合表示我们自己世界的膜世界。

第 12 章 | 膜世界与平行宇宙

一个理论统治它们一切，
一个理论去寻找它们，
一个理论量子化它们一切，
在约束它们的黑暗中，
在阴影笼罩下膜的国土。

——向 J·R·R·托尔金致歉

薄膜人才库

远离哈佛枝繁叶茂的校园中心，有一座红褐色砖砌成的建²⁶⁷筑物。年轻的物理学家正在里面规划新的非凡大道，以此描述自然，这就是杰弗逊（Jefferson）物理实验室——建于 19 世



纪晚期，它的里面随处可见玻璃橱、示波器、本生灯^①等，让它理应成为传统科学的领土。追溯往昔，理论研究也在这个建筑的某个地方进行，一般说来在最高层；而理论的研究结果可以被另一层中的人检验，一般都在地下室。实际上，西翼楼里面有一个特殊的塔楼，用来测量地球的旋转导致物体下落位置向东的偏转。20世纪60年代，物理学家庞德（Robert Pound）也用相同的立轴测量光线的引力红移，并用得到的值与爱因斯坦的预言比较。

268

如今，实地验证实验的选址与以前大不同，因为检验现代场理论需要非常高的能量。不过，这种神圣的安排依然如故：高能实验组的办公室位于建筑的上层，远离马塞诸塞州的土地，与天堂最近。

而理论组的办公室围成一圈，环绕着研究室的鱼缸，维布伦喜好这样温暖舒适的安排。一块硕大豪华的黑板从很高的天花板一直挂到了地毯，占据了所有的墙面。这块黑板每天早晨被擦拭一新，中午他们在上面画满潦草的字母、环形图案以及方程。如果写得太多没有可供利用的角落或者狭隙，学生就会利用自己的黑板和椅子说明自己的想法，打动导师。

格拉肖曾经发誓要让哈佛远离弦理论。而如今，要去他的办公室，人们必须穿过一个入口，而入口两边是两位最著名的弦和膜理论家的办公室：阿卡尼哈默得（Nima Arkani-Hamed）和兰德尔（Lisa Randall）。他们以各自独立的、革

① 本生灯：一个很小的实验室用灯，由一个竖立的金属管与一个进气源相连而成，通过由底部可调节孔进入的空气与气体混合，可产生温度十分高的火焰。

新的观点打造宇宙的引力模型。这些科学界超级明星的膜世界的想法，在最近一些年，远比其他理论文章，产生了更多的共鸣。

仅毫米以远

阿卡尼哈默得一头长长的棕发从脑门中间分开，年轻英俊极富魅力，无论怎么看都像是一位摇滚明星。他更多的是不定期出现在哈佛广场与众人一同享受交响音乐会，而不是穿着一身刻板的衬衣，出席官方的大学典礼。他更善于用粉笔说话，而不是逞嘴舌之利，他以自己的方式吸引了许多的追随者。他没有沉浸于吉他的旋律中，而是让研究生围绕在身边听他滔滔不绝讲述在看不见的世界到处游移的微小的振动。

在阿卡尼哈默得大约 30 岁的时候，他已经辗转过许多地方。他生于休斯敦，父母是两个伊朗物理学家，他们辞去了原来的大学职位来到休斯敦，阿卡尼哈默得就出生在这里。不久，他家搬回了伊朗。接着国家爆发革命，因为他们极高的科学地位以及与西方的联系等政治问题，他们被迫逃离了这个国家¹。最后，他们在多伦多结束了逃亡生涯，他的父亲在那里找到了一份新的工作。

269

尼玛安全地在加拿大上高中，他开始着迷父母的专业。进入多伦多大学后，他选择了数学物理专业。接着，他去伯克利大学并在那里拿到理论物理博士学位。这让他于 1997 年，成为斯坦福线性加速器中心（Stanford Linear Accelerator Center, SLAC）理论组的一名博士后。当一些人沉迷于科学



讨论时，他已经开始到处寻找合适的合作项目。

很幸运，斯坦福一位德高望重的物理学家已经迪墨波罗（Savas Dimopoulos）正在寻找新的研究机会。迪墨波罗在希腊雅典长大，在芝加哥大学获得理学博士学位。20 世纪 80 年代，他与乔吉（Howard Georgi）一道，发展出了标准模型和大统一理论的超对称形式。尽管他们的理论可以由实验检验，但是当前的加速器和检测器不足以胜任。由此，在等待新一代的加速器的时候，迪墨波罗眼光开阔地考虑另外的假设，特别是那些实验物理学家更容易检验的假设。“我认为做出实验更易于检验的预言是我们的工作。”迪墨波罗说。²

他对可检验猜想的兴趣让他和阿卡尼哈默得以及物理学家德瓦利（Georgi Dvali）、安东尼娅达斯（Ignatius Antoniadis）一同对一个长期以来的物理难题，给出大胆的答案。自然力最神秘之处就是为什么引力比其他力弱得多，例如，一把小梳子与一块布摩擦产生持续的静电力，大小足以超过整个地球的引力，吸住桌面上的一些小纸片。狄拉克和约旦都尝试过解决这个问题，这便是他们改变引力常数的理论中著名的“等级问题”。而斯坦福的合作者们非常敏锐，提出这种差别来源于引力逃逸到一个大的额外维数。

270 在一些重要影响的文章中——其中有一篇由安东尼娅达斯写的，研究人员描述了膜世界的构架，以此解释引力相对微弱的问题。他们模型的第一个组成部分是我们熟悉的空间，就像在霍拉瓦-威藤模型中一样，他们把这称为三维的 D 膜，也可叫做三维膜。这个三维膜就像有选择性的捕蝇纸，可以黏住开弦，让闭弦远去。几乎我们熟悉的每一个粒子都永远囿于我们

的膜上，但引力子与众不同。对于闭弦，它们可以自由地脱离我们的膜，去另外维数探险。

如果这是完整的物理图景，那么引力就会无穷小于其他相互作用力。就像不加管束的宠物，所有的引力子都将完全、永远到处闲逛。那么，无论如何，在我们空间有质量的两个物体都不会受到引力的相互吸引。那么，是什么把引力子圈在一个足够小的区域，让相互作用一直发生？

如斯坦福小组提出的，答案在于存在第二个三维膜，在额外维数方向，与我们所在的三维膜相距小于一毫米。这就把引力子约束到一个有限的区域——两个膜之间的“囿空间”；让引力局域化的同时，也为它提供了足够的空间来说明相互作用力的相对微弱。

我们可以用一个例子说明引力子被局限于我们的三维膜上，或者被约束于一块小而有限的“囿”空间内，或者完全自由地闲逛的差别。这就好像我们把一只狼放在一个人的家里、庭院中或者完全放了它。如果把它约束在家中，狼的影响最大；它会弄坏家具，吓跑客人，吃光食物。如果把它完全放归野外，这头野兽就会在旷野自由自在地漫步，可能完全不与人接触。而对于中间那种情况，狼会警觉地在范围有限的花园中来回穿行。最后一种情形，相对完全自由，将会带来更多的混乱，但远远小于把它关在家中的后果。类似的，被局限于一毫米宽的“囿”空间的引力虽然有一定大小，但也远比禁锢于膜的力小得多。

由阿卡尼哈默得、迪墨波罗和德瓦利（以及安东尼娅达斯的建议）巧妙构思的这个框架便是著名的“大额外维数”



(large extra dimension) 图景，初期有时也被人们称为 ADD。一般说来，我们并不认为一毫米有多大，不过与以前提出的紧致区域的微小尺寸相比，当然很大。

271 人们会认为加入一个大的额外维数将从根本上改变物理定律。比如说，埃伦费斯特特预言，超过三个空间维数将会改变人们熟知的引力与距离的平方反比关系。在宇宙的尺度上，这就会使行星的轨道失去稳定性。

不过，ADD 模型已经考虑了这点（20 世纪 90 年代），引力定律并没有在毫米级别接受检验。没有人知道在这样细微的尺度上，万有引力定律是否保持原样。剩下的工作就交由实验物理学家来验证。在额外维数模型长期的发展史上，它第一次被放到了实验桌上，而实验物理学家也欣喜于这个新的机会，设计实验来探索引力的亚毫米结构。

邻近的黑暗

晚上，一个人沿着一条寂静的小路走下去，如果旁边出其不意地出现什么，你一定会大吃一惊。而如果突然遇到一个陌生人，即使过来的只是一位带着爱狗漫步之人，你也可能会一阵紧张凉到背脊。现在，设想一样陌生的东西与你仅仅距离不到一毫米，我们简直可以感受到它灼热的呼吸。这就是阿卡尼哈默得和他的同事对平行宇宙近似的描绘。它令人毛骨悚然地紧挨着我们，仅仅通过一张细得不能再细的帘子将我们与它分开。不过，无论我们有何企图或者想法，这个障碍是无法穿透的，除了引力。就像冷战年代的柏林墙，它让两边的人们失去

联系沟通。

很奇怪，宇宙学家们在他们传统研究中遇到过这种无法解释的，像幽灵一般的东西。许多年后，他们意识到巨大无垠的宇宙实际上填满了各种看不见的物质，只有通过引力才能确认它们的存在。

例如，星系外围的恒星环绕速度理应快得多——即使考虑星系中所有物质。相当多的物质下落不明，只有通过引力的牵扯力才能知道它重要的存在。宇宙学家们相信这种看不见的物质的一小部分属于非常黯淡的恒星，可以通过大质量致密晕族天体（Massive Compact Halo Objects）认识。还有一部分与中微子的质量有关，众所周知这些粒子难以检测。其余广阔的未知物质人们就不清楚了。²⁷²

2003 年，威尔金森微波各向异性探测器（Wilkinson Microwave Anisotropy Probe）给出了天空的微波辐射极为详尽的图景。国家航空和航天局（NASA）设计了这颗特殊的卫星并将其送上轨道，记录大爆炸以后残余下来的宇宙背景辐射在各个方向上的温差。它与其他测量仪器一起，让人们得以窥见宇宙中的物质及其分布。

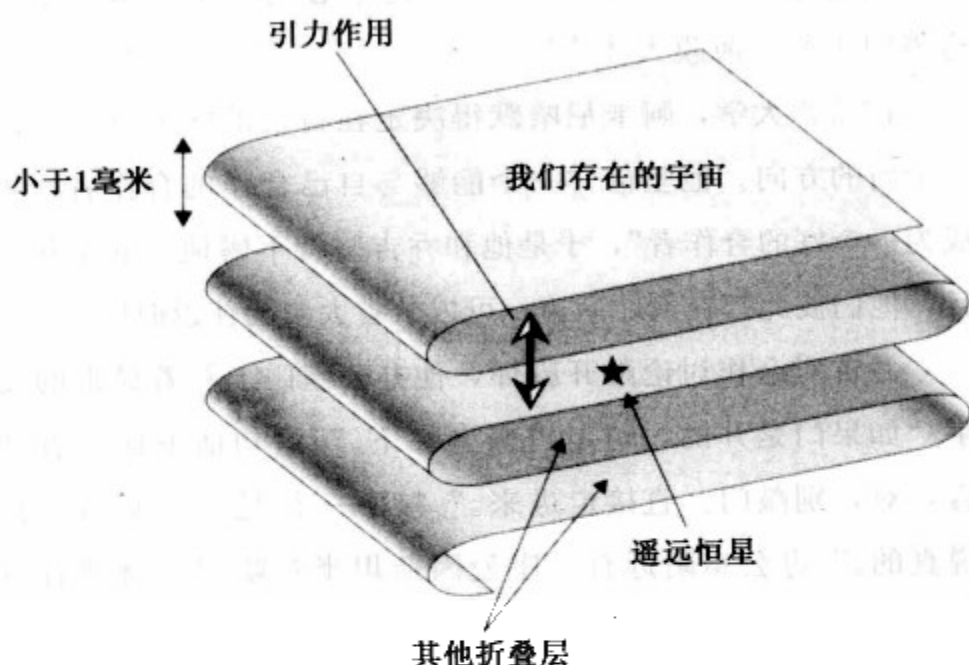
新的宇宙学测量结果确认了让人困惑的宇宙的构成。微波各向异性探测器表明，仅仅只有 4% 的宇宙物质由传统的重子物质组成，例如质子和中子。大约 23% 的物质以所谓的冷暗物质形式存在。这个低温的、非重子的物质通过引力作用，而不是光线（至少不是很容易）。剩下的 73% 的东西被称为暗能量——一种反引力的东西，可以造成宇宙加速扩张。现代宇宙学最神秘的问题之一就是这些藏匿于宇宙深处物质的性质。



阿卡尼哈默得、迪墨波罗、德瓦利和斯坦福的研究员卡尔卢普 (Nemanja Kaloper) 认为存在一个特殊的膜世界，有可能解决暗物质的难题。他们的建议称为多流形宇宙 (Many-fold Universe)，它描绘出一个沿着高维折叠起来的单膜，看上去就像一把扇子或者手风琴。其中的某个褶皱对应我们所在空间区域，其他褶皱对应非常遥远的区域。折隙被所谓的“囿”空间大量填充，这个像刀锋一样薄的区域对一切物质禁闭，除了引力子。

多流形模型可以这样解释暗物质。假设一位宇航员把他的望远镜对准某个星系。尽管那片空间区域的光线源自我们所处褶皱的行星和气体，但我们或许可以通过这些光线，间接地观测到另外褶皱中物质的引力效应。就像第一章提到的印度尼西亚的木偶戏一样，或许借助这些光线可以检测到藏在我们现实世界后面的、平行世界的引力的蛛丝马迹。这些宇航员可能接着相信那些看不见的影响来自大质量致密晕族天体或者隐晦的物质，但是实际上，功劳应当归于额外维数。

273 例如，考虑一颗恒星从数十亿光年的地方发光（也就是说，距我们几十万亿亿千米）。它的光线可能需要数十亿年才能到达地球。按照经典物理，它的引力的影响也需要这么长的时间才能到达。不过，在多流形宇宙中，如果存在与我们宇宙区域分离的区域，那么那个区域的引力子就可以径直穿过膜。因此，光线与相邻的物质相互作用，因此穿越空间时运动轨迹发生扭曲。它们甚至可以重新形成伪辐射路径。简而言之，这颗遥远的恒星可以在我们区域产生幽灵般的效果，以此表明它就是暗物质。



多层宇宙的剖析图。在这个模型中，我们的膜世界像毛毯一样的折叠。只有引力可以自由地穿越“圈”空间，从折层中逃逸。让人信服的是，几个折层以外的遥远恒星的吸引，可以通过它对我们世界物体的影响，被人们感知。不过，来自恒星的光线局限于膜中，受引作用，看上去不像从真实的位置发出来的。因此，我们就把这个恒星难以察觉的引力作用误认为是暗物质造成的。

维数的解构

阿卡尼哈默得在斯坦福线性加速器中心做完博士后工作²⁷⁴后，去伯克利待了一段时间，接着在 2001 年哈佛大学任命他为教授。兰德尔的聘任大约也在这个时候，1998 年还聘用了斯特罗明格，这是哈佛大学物理系大胆尝试的一个新方向。哈佛准备与普林斯顿大学、斯坦福大学、加州理工学院、圣巴巴



拉大学以及其他成立了弦和 M 理论中心的大学竞争，希望成为美国主要“薄膜人才库”。

在哈佛大学，阿卡尼哈默得决定在自己的研究领域，选择一个新的方向。他坚信“一个能够与自己合作的合作者，才会成为一个好的合作者”，于是他和乔吉坚持不懈地一起工作。而且，他们彼此都在大厅南边，可以节省大量的往返时间。

乔吉对合作讨论敞开胸怀，他办公室门上写着显眼的几行字“如果门是开的，请走进来坐一下。”这句话下面写着“附言，对，别敲门。直接走进来。”接下一行是“再附言，我是说真的。”办公室附近有一座爱因斯坦半身雕塑，凝视着所有来往的人。

这个与波士顿大学理论家安德鲁·科恩（Andrew Cohen）联合进行的项目，称为“解构维数”。在字面上，“解构”是由法国哲学家德里达（Jacques Derrida）20 世纪 60 年代发起的一项运动，旨在用特定的方法进行文本分析。这个词现在有种通俗用法，即找到一个方法，把整体思想分解为最基本的方面。在它的鼓舞下，阿卡尼哈默得、科恩和乔吉希望从完全没有量纲的结构中提取出最基本的物理维数。（来自费米实验室的第二个小组也提出了和他们类似的竞争目标。）

很讽刺的是，他们的方法令 M 理论与超越时空几何构架的锡拉库扎方法更相符，后者是由伯格曼等人发展出来的。这个技巧让宇宙起源变得更加不可思议。这个假设最激进的一种观点是，宇宙不仅仅从非常紧致的物质中开始，而且它完全是从一个点开始的，接下来所有的维数戏剧般地产生。

有维数的世界。在艾博特的《平地》中，主角梦见了一个直线世界，只有一个维度的世界。他遇到了那里的国王，国王的运动被限制在左或者右两个方向，而国王所看得到的只有每一边的点。这位国王眼中的世界如此的拘束。设想，人如果在一个没有空间运动方向的宇宙中唯我地存在，结果会是如何呢。我们的生存依赖运动与变化，这样一个没有维度的世界完全不可思议。

由哈佛和费米小组提出的维数的创造过程，有些类似于一块干冰的蒸发，不过前者是由温度下降导致的，而后者是通过温度上升产生的。在干冰中（或者任何固体物质），分子运动的自由度相对比较小。它们被约束在晶格中，移动只能略微偏离平衡位置。现在，假设如果分子在任何方向都无法运动（在经典物理中，这种状态被称为绝对零度，不过不可能达到）。它们会被有效地固定在自己的位置上，完全不知道维度的存在。而在室温下，干冰很快就会变成二氧化碳气体。分子可以在任何方向自由运动，这让它们完全理解三维世界的存在。因此，某种意义上，可以说它们获得了维度。

在解构维数模型中，宇宙温度的降低而非升高，导致了这种相变的发生。刚开始，没有任何力存在，因此也没有运动的可能。当宇宙冷却下来，它就从没有维数的初始态转变为具有维数的低能态。这个维数与力一同产生，因此出现了点之间的运动。因而，空间从最初坚实的“冰块”中解放出来。

这个模型更为保守的观点是，宇宙由传统的四维时空开始发展。这种情形下，只有额外维数动态地产生出来。当能量降低时，会产生新的相互作用，因此也出现了高维的运动。通过



这种方法，乔吉和他的同辈们引领的传统规范，可以神奇地转化为阿卡尼哈默得和他同事提出来的大尺度额外维数方法。

喂，马德西纳！

21 世纪初物理界的新兴课题之一，是建立传统高能方法与新颖的卡鲁扎-克莱因方法——包括膜和弦理论的更加紧密的联系。阿卡尼哈默得、科恩和乔吉的精诚合作，只是一连串的将这个世界紧紧地捆绑到一起的编织方法之一。

年轻的阿根廷物理学家马德西纳（Juan Maldacena）做出了一个厉害的推测，极大地促进了两者相互对话。当有关膜和弦理论的介绍在 20 世纪 90 年代后期出现后，马德西纳的目标就是成为罗塞塔之石（Rosetta Stone），它可以让多维 M 理论转变为四维规范理论，反之亦然。这是非常有意义的转变。

当出席圣巴巴拉弦会议的物理学家第一次得知马德西纳在这两片思想的疆域之间架起大桥时，他们真的在走廊上跳起舞来。以街舞的方式，弦的主人哈维（普林斯顿著名弦论四子之一）一边敲着钢琴，一边模仿拉丁音乐《玛卡莲娜》（*The Macarena*）的流行调子，唱起了打油诗。就如麦克斯韦的科学诗歌一样，哈维也聪明地把新的发现编成诗。同时，数以百计的弦理论家排成行，以精心设计的姿势为之伴舞。歌词这样开始：

你始于膜，而膜为 B. P. S

然后你走近膜，其空间为 A. D. S

谁知其意——我不知道，我承认

啊——！马德西纳！³

在哈维的打油诗中，B. P. S (Bogomol'nyi-Prasad-Sommerfield)说的是膜的特殊的超对称条件，A. D. S指的是反德西特空间，它是爱因斯坦广义相对论一个独特的变化形式，包含了负宇宙常数（负引力项）。反德西特宇宙的膨胀随着时间的流逝会逐渐慢下来，与德西特宇宙相反，后者趋向于加速膨胀。哈维提起B. P. S膜和A. D. S空间代表马德西纳理论的两个必需条件。这首打油诗后续部分描述了这个方法的其他部分。277

马德西纳的猜想是用科学的文体而不是用来伴舞的诗歌写的，主要说的是特定的弦和标准量子场论在性质和结构上的数学联系；前者是在马鞍状的五维“圈”空间上的弦的性质，后者指的是局限于这个五维空间中的四维区域的标准量子场论结构。镌刻在M理论宇宙外部的，是超对称杨-米尔斯模型的规范理论。这让大部分高能物理学家很感兴趣，而不仅仅局限于弦理论家，就好像这个弦会议的与会者轻轻地叩窗子，为站在窗外的更传统的同事们传递消息一样：“我们正在里面研究一些很重要的事情，因此你们可以先扫几眼大概，以便知道如何应用它。”

马德西纳的提议与**全息原理**（holographic principle）紧密相关。全息原理是由特胡夫特和萨斯坎德（Leonard Susskind）首先提出的假设，指的是特定空间区域的边界与内部所含信息量的关系。黑洞里面的内容就是这样外推出来的，它是



致密的恒星残余物，这个名字是由约翰·惠勒起的。科学家描述黑洞并不是依据它里面有什么东西，而是依据它外部性质。比如说，当黑洞吞噬了其他物质，它的边界面积就会扩大。这个面积与它里面的熵，或者无秩序程度成正比。全息原理说明这对整个宇宙，也应该是成立的。也即，为了认识宇宙，我们必须理解它的外部边界。

通过一个封闭体系的外部来描述它自身，相当于调低一个维数。因此，为了弄清楚三维气泡，人们只需考察它薄薄的表面，而要理解一个五维的气泡，理解它四维的膜面（三维膜加上时间）就足够了。所以，马德西纳神乎其技，或者像哈维说的：

278

谁说它们相同——他声称的全息原理？

啊——！马德西纳！⁴

全息原理和马德西纳的推断为弦理论会议提供了大量讨论话题，不论在数学上还是音乐上。但是这些会议不全是音乐和舞蹈。会议结束期间，理论家们开始与自然交流，并私下问她这些假设是否正确。这场与伟大的超越的对话总伴随着一些户外运动。

险峻的地形

当玻尔面对量子物理的基本矛盾需要宁静思索的时候，他习惯于徒步旅行或者滑雪。克莱因和玻尔的助手也常常加入玻

尔的行列。现在，理论物理学家中最流行的体育项目与越来越险峻崎岖的地形有关，即攀岩。

把自己挂在悬崖边上，需要特别的勇气。一把一把地抓紧，一脚一脚地踏牢，并祈祷崖壁足够固实，可以承受得了人们的四肢与命运。与风雨、太阳和眩晕搏斗过后，与最棘手的方程组斗争也不过就像儿戏一般。面对极限地形，每一步可能就是最后一步，这才是对恐惧更好的注解；而文章报告完毕，面对苛刻的观众担忧根本算不上什么了。

在崖壁上攀援，人们或许会同情开弦的境况。它们的一端永远地固定在 D 膜上，而邻居闭弦却可以穿越宏伟的“圈”空间，自由地漫步。难怪攀岩和山地运动在 M 理论家中如此流行。这些狂热的爱好者包括圣巴巴拉大学的吉丁兹（Steven Giddings），他已经习惯于征服洛矶山脉^①和内华达山脉^②等；加州理工学院的库伯斯（Steven Gubser），他攀登了陡峭的大梯顿山^③；现在纽约大学工作的德瓦利，艰苦跋涉，穿越了高加索山脉；而宾夕法尼亚大学的奥维儒特（Burt Ovrut）爬过了约塞米蒂国家公园^④的仰角崖面。

奥维儒特发现理论物理技巧和攀岩在技术上有紧密的联系。“前者让你知道关于自然的一些抽象的东西，以及它是如何运行的。”他说，“而对于后者，你必须紧紧跟随美丽的岩石

279

① 北美洲西部从美国阿拉斯加州西北部延伸 4827 公里至墨西哥边境的主要山系。

② 美国加利福尼亚州东部的花岗岩块状山脉。

③ 美国怀俄明州西北部特顿岭的一座山峰，海拔 4198.6 米。为该山脉海拔最高峰。

④ 美国加利福尼亚州中部。



裂缝。两者都是值得认真理解和解决的。”⁵

兰德尔是另一位热心的攀岩者，她凭着纯熟的登山技巧征服了各种障碍。即使在这个时代，妇女能够成为理论物理教授也不是一件容易的事，她是新一代的杰出典范。

兰德尔 1962 年生于纽约的昆斯区，她的家族天生具有数学禀赋。年纪轻轻，她就在求解各种问题上显出杰出的才能。她进了史岱文森高中，这是下曼哈顿地区最好的高中。她参加了数学竞赛团队，并升到了副领队。团队的成员知道这将是走向成功人生的跳板，小组的强化训练课就是几乎每天不停地计算非常费脑的问题。布莱恩·格林（Brian Greene）曾在这支队伍中，最终成为一位著名的弦理论家和作家。丽萨的妹妹多娜也在这支队伍里，她最后成为佐治亚理工大学的教授。

1980 年，兰德尔从史岱文森高中毕业。她是享有盛誉的“西屋奖学金”的获得者，这是一个国家级的竞赛，以此找到具有天赋的年轻科学家。她到哈佛继续读书，并在那里拿到了学士学位和理学博士学位。她的导师只有乔吉，他指导她细细体会现代超对称场论。她相继被普林斯顿和麻省理工学院聘用，并成为 Sloan 基金学者，之后她回到了母校并于 2001 年成为教授。

那个时候，兰德尔已经非常出名，因为她和桑卓姆（Raman Sundrum）发展出一套新颖的高维方法。兰德尔-桑卓姆模型非常聪明地利用“圈”空间的卷曲，将膜附近的引力局域化，以此给出了与 ADD 相媲美的又一个迷人的模型。兰德尔和桑卓姆的文章激起了弦理论家和宇宙学家的大量对话，探索这两门学科之间的关系。

桑卓姆 1964 年生于印度的马德拉斯。不像他的理论，他几乎没有“局域化”地存在过。1965 年，他家迁徙到美国，1970 又回到印度。在去澳大利亚的堪培拉之前在印度待了 3 年。桑卓姆在悉尼大学完成了他的本科学习，接着飞到耶鲁继续他的研究生学习。他的博士导师是宇宙学家劳伦斯·克劳斯 (Lawrence Krauss)，此人不久后成为重要的科普作家。现在，桑卓姆是约翰·霍普金斯大学的教授。

桑卓姆不像他的同辈人，他对攀岩或者爬山没兴趣。他喜欢静静地阅读，他曾经长时间地沉迷于科学哲学问题。如果没有在研究高维，那么钻研人工智能的性质和探究进化的神秘就成为他最热衷的两个研究方向。

宇宙常数的大小，这个 M 理论中最让人困惑的问题之一，把桑卓姆吸引到这个世界。卡西米尔效应 (Casimir effect) 预言，真空也包含了一定的能量。在爱因斯坦的方程中，真空能被作为一个额外的反引力项对待。宇宙常数的存在，意义深远，它预言宇宙以很高加速度膨胀。换句话说，理论物理认定，宇宙在以一个不断增加的速度暴胀。最近的测量表明，宇宙确实在加速膨胀，不过远比理论预言的小。

为了解释宇宙常数为什么那么小，桑卓姆与兰德尔合作，创造出一个膜世界。这个世界与 ADD 方法创造的世界在性质上的差异巨大，它不是一个平坦的、在两层膜之间填充着毫米尺寸的额外维度的世界。他们把马德西纳的猜想铭记心中，围绕单个膜，创造出一个马鞍状的反德西特宇宙（他们合写的另外一篇文章有两个膜，这让兰德尔-桑卓姆模型有些含混不清；这里我们只关注单膜理论）。借用《星舰迷航》电视系列剧中



的一个词，他们利用一项名为“卷曲因子”的特殊参量控制额外维度的形状。

281 反德西特空间的美妙在于，它有一个负的引力常数。很幸运，这个引力常数使膜上的真空能量精确地消除，仅仅剩下一点点残余效应。人们可以依据天文学家观察到的宇宙加速度的大小，相应地调整这种平衡。

此外，负曲率对引力产生聚集效应。实际上，它将引力子局限于非常接近膜的区域。就像科罗拉多河的水流经布满岩石的峡谷一样，它们受到地形约束。只有在非常高的能量时，超出当前的探测能力时，它们才可能从这样的“大峡谷”（Grand Canyon）逃逸。因此，尽管引力可以离开膜，使得自身比其他力弱得多，但是它不能够扩展到非常远，从而变得微不足道。

让兰德尔和桑卓姆大为惊异的是，这种聚集效应可以发生于任意尺度的额外维数。即使高维是无限的，引力仍然可以保持与真实世界一样的形式。尽管额外方向与空间自身一样广阔，但是它无法展现自己。因此，研究人员意识到，他们发现了可以媲美“紧致化”的又一可行的方法；额外维数不需要卷曲；它们可以无限地伸展，但是引力依然是局域化的。

兰德尔和桑卓姆的方案就像披头士劲爆的新唱片一样，震惊了物理界。一夜之间，许多的理论家开始按着新的节奏跳舞（尽管不是完全按照马德西纳那次的方式）。桑卓姆回忆，“紧致化的替代方案真的让人惊讶，因为一段时期以来，看上去除了紧致的确没有别的路可走。它就像一个神奇的魔术一样，让包括作者在内的人极为震惊。同时，它也很神秘，因为它有一

个秘密的、卷曲的时空。”⁶

无限的延伸

兰德尔-桑卓姆模型不是第一个描述无限额外维度的模型。早在 1962 年，美国普渡大学的研究员约瑟夫（David W. Joseph）就提出了一个类似的时空：它存在一个“势阱”（势能的低点），被一个广阔延伸的多维空间包围。让人很奇怪的是，他的文章并没有引用卡鲁扎-克莱因理论，所以文字相对晦涩。另一篇不出名的文章是由俄国理论家维勒里·鲁巴柯夫（Valery Rubakov）和美沙·莎波斯尼可夫（Misha Shaposhnikov）写的，它第一次提出额外维数可能会削弱引力的力量。²⁸²

接着，到了 1986 年，剑桥大学的物理学家吉本斯和威尔特（David Wiltshire）重新研究了这个问题。他们描绘出四维的膜（在它们被昵称为“膜”之前），它被嵌入更高维数的宇宙。这个高维区域非常不友好，大部分都是黑洞，让温顺的人只能老老实实地待在四维子结构中。可以说，物理定律保证了我们观测到的一切东西都局限于后一个空间中，而没有延伸至前一个空间。不过，剑桥的理论家很失望，他们并没有找到引力局域化的方法。

若干年后，加拿大沃特卢大学的天体物理学家文森（Paul Wesson）发展了一套经典的（非量子的）五维理论，他的理论中任何方向都辽阔无边。他复兴了爱因斯坦的观点：一个统一理论应当从几何结构中解释物质。文森修改了卡鲁扎-克莱因的假设，他去掉第五维必须紧致要求。这就在爱因斯坦方



程中产生了额外项，他把它们的内容看成宇宙中的物质和能量。自那以后，文森成立了一个国际“五维‘空间-时间-物质’联盟”，来促进卡鲁扎-克莱因思想的研讨，特别是修改卡鲁扎-克莱因理论让它包括一个无限的额外维度的观点，更是他们前进的观点。

这些方法的共同点在于，它们觉得某些维数紧致而另外维数没有，会破坏自然界的平等。为什么一些世界的高速公路可以永远无限延伸，而其他世界的会卷成一个致密的圈？是不是工程师在这个世界中可以要求长、宽、高是直的而且无限，而要求其他维度中的运动都只能是一个个细微的环路？

但是，吉本斯指出标准的卡鲁扎-克莱因紧致方法相比无限额外维数有某些优点。“原始模型相当完善，”吉本斯说，“它将信息控制在内部。而对于一个具有反德西特背景的单膜，有可能存在奇点上的困难。信息可能来自宇宙之外。”⁷

283

吉本斯关心的是，兰德尔-桑卓姆宇宙可能破坏因果定律。事件发生的根源可能超越了我们看到的空间。事实上，任何事情都可能莫名其妙地出现。由于“圈”空间与膜奇怪地相互影响，一条鲨鱼可能突然出现于游泳池。可能在某一天，我们可以理解整个的宇宙，这种感觉让我们越来越不安。“我喜欢把它想象成一个生物学的图景，”吉本斯说，“就像池塘中的藻类，任何时候它都可能出现，将你毁灭。”⁸

至于兰德尔和桑卓姆，他们各自转向了不同模型的研究。他们保持开放的思想，研究各种方法，从更传统的紧致理论到膜的不同组合。比如说，兰德尔不能确定，单膜还是多膜，哪个可以更完美地描述这个宇宙。

“它们的应用不同，”她指出，“我有一个学生正在研究一个可以再现四维的双膜的反德西特空间。我们仍然在努力尝试，看哪一个理论是最好的。”到了游戏的这个阶段，她说，“我们只需要知道有什么可能性。”⁹

宇宙碰撞时

斯坦哈特（Paul Steinhardt）领军宇宙学领域很长一段时间。其中，最著名的是他与别人合作提出了暴胀宇宙模型。大爆炸发生后，在很短暂的时间内，宇宙极速膨胀，暴胀模型补充说明了这一阶段的情形。它有助于解决大量的困难，比如为什么宇宙在所有方向表现出相对的均匀。当空间如此迅速地扩张，所有的瑕疵都被抹平，使宇宙像薄饼一样平坦。

天文学家最近的发现预示了暴胀模型的光明前景。来自诸如微波背景辐射各向异性探测器的宇宙微波背景辐射图片，支持这个模型预言的宇宙史（虽然并非最简单的情形）。这给了古斯、林德和阿尔布雷特（Andreas Albrecht）以及这个方法的其他创立者许多欢庆的理由。

尽管斯坦哈特有同样的理由高兴，不过他更多地注视着不能忽视的危机——即人们过于依赖于某个特殊的模型。“当需要认真对待的对手只有一个时，并非良好的状态，”他建议道，“最好有两个或者更多的模型相互竞争，这可以迫使你更加仔细地思考你的理论、你的预言和观测结果。”¹⁰

因为这个原因，他开始和弦理论家、宾夕法尼亚大学的伯奥卢特、剑桥大学的图罗克（Neil Turok）以及普林斯顿大学

284



的考瑞 (Justin Khoury) 寻找以膜世界图景为基础的宇宙均匀分布的其他解释。他们把膜放在一起，发展出一个碰撞图景，它可以模拟由暴胀产生的能谱。两个膜——其中一个表示我们自己的空间，另外一个捣蛋的三维膜刚好朝我们所在的三维膜方向前进，于是它们彼此之间沿着额外维度发生碰撞。在这场宇宙的大灾难中，我们的膜就像失事的汽车，温度不断升高。所有这些冗余的能量都将转变为热物质和辐射，这在根本上制造了一个不存在奇点的（即不存在无限密度的一刻）早期宇宙的大爆炸条件。因为这两个膜是均匀的，它们碰撞的产物也应该基本上是均匀的，这就与暴胀的效应很像。让人瞩目的是，因此产生的宇宙背景辐射光谱也类似于暴胀后的结果。研究人员给这个模型起了个绰号叫做“火宇宙”^①，这个创意来自古希腊斯多葛学派，他们认为宇宙在火中再生。

另外一种相关的观点称为“循环宇宙”，其中，斯坦哈特和图罗克描述了两个膜的碰撞是如何创造出一个无始无终的宇宙。他们借用古希腊的概念——即万事万物都历经无尽的创造与毁灭的周期，来说明一个特殊的膜世界图景无需借助时间的开端或者终结就能解释当前天体物理学的数据。我们所在的膜和其他世界的膜周期性地碰撞，能量在宇宙中汹涌澎湃；这就抹去所有存在的事物（可能除了黑洞），为新的星系的形成播下种子。这些星系经过几十亿年的发展，承载了各式各样的生命形式，直到它们在一场旷世浩劫的“大坍缩”中毁灭。这个

^① ekpyrosis 在希腊语中的意思是“大火”，古希腊斯多葛学派的宇宙模型就认为宇宙是一团大火，处在诞生、冷却和再生的永恒循环中。

过程周而复始，亘古不变。模型的创立者觉得，他们的新方法可以简化宇宙命运与起源的难题；同时，也印证了业已预言的史诗般的大爆炸/暴胀的强度。此外，他们设计的这个模型可以解释最近发现的宇宙加速膨胀现象。 285

尽管“火宇宙”和“循环宇宙”在传统模型之外又给出了一个迷人的奇妙的模型，不过，他们必须争取更多的支持者。斯坦哈特和他的同事已经听到宇宙学界与超弦界的质疑声。他非常失望暴胀理论的其他合作者拒绝把膜世界作为另外一种可以认真考虑的方法。

比如，林德就对“火宇宙”和“循环宇宙”模型极端怀疑。在一次纪念剑桥大学著名理论物理学家史蒂芬·霍金(Stephen Hawking) 60岁生日的演讲中，他对这两种说法逐条批驳。他指出，在他看来，暴胀模型有很多成功的预言但膜世界模型却无法与之媲美。不过，因为这是一次生日欢庆会，林德以正面评述结束演讲。他祝贺火宇宙和循环宇宙模型的创立者，发展了一个他自认为除暴胀模型之外的最好的选择，这证明暴胀模型甚至可以击败最勇敢的挑战者。

斯坦哈特期待着他的宇宙学家同事们的热烈响应，可是事与愿违。主要弦理论家的反应让他略感窘困。他明白，那些人坚信目前还不是发展以膜为基础的宇宙学的恰当时机。斯坦哈特解释道：

弦理论和宇宙学之间存在一个问题，即弦理论无法处理舍时问题。他们没有注意这一点。他们是不同性质的两个领域：宇宙学是讲述整个宇宙的故事，而弦理论则是更



基本的数学工具。它们被人们不恰当地搭配到一起；因此，人们会站在怀疑的立场上，因为他们不会说：“嗯，这符合弦理论。”这是有一些难受。虽然想法很有意思，但懊恼也伴随左右。

兰德尔同意，在被弦物理界接纳之前，膜宇宙任重道远。“它们还没有完全发展起来，”她说。¹¹桑卓姆赞同这个说法，他评论道，“这里钟声气笛混杂，扭曲和旋转纠缠。你可以加或者减，以此得到所想。”¹²不过，人人都支持弦理论家和宇宙学家保持对话，希望有朝一日，可以出现一个宇宙的完整的模型，可以从最小的区域到最大的世界兼容并包。

置诸检验

286 宇宙学是检验高维假设的唯一方法。弄清楚场理论正确与否的更传统的方法是利用粒子加速器。研究者利用诸如“原子碰撞机”等装置来证实许多 20 世纪的理论，包括夸克、轻子等这些来自同一家族的粒子，以及标准电弱模型。

如果人们发现了超对称伴子，那将极大地促进超弦、超引力和 M 理论的发展。理论学家希望欧洲粒子物理研究所的大型强子对撞机（LHC）能够提供产生夸克、标量电子、中立子等理论假设粒子所需要的能量。大型强子对撞机计划于 2007 年投入使用，届时将以 14TeV 的能量碰撞质子对，这相当于把数十亿只电池的能量集中于比跳蚤小数万亿倍的一点。两个质子通过 16 千米长的环形管道后碰撞，碰撞之前它们的

速度已经极为接近光速，碰撞后将会产生粒子束流。大型强子对撞机的能量比目前使用中的能量最高的美国费米国家实验室的万亿电子伏加速器（Tevatron）还要大。

不过，就算大型强子对撞机在实验上确认了超对称，依然不足以证明额外维数的存在。因为有四维和十/十一维的超对称模型，超对称粒子的发现可能无法提供足够的证据区分两者。超越空间和时间的确凿的维数证据需要通过独立的方法获得。

发现额外维数的前景很大程度上取决于维数的大小。普朗克尺度大小的轻微卷曲的管道只能通过间接的方法探测。相反，由阿坎尼哈默得、迪墨波罗和德瓦利提出的大的额外维数容易检验得多。大额外维数为亚毫米尺寸，在此尺度下，引力定律将与大尺度存在明显差异。如果理论正确，引力不再遵从平方反比定律，它将减小到距离的其他次方。因为有可能检测到这种效应，实验物理学家开始兴奋地行动。

287

2001年，Eöt-Wash 引力研究小组宣布了他们对亚毫米引力行为测量的结果。Eöt-Wash 小组是华盛顿大学的团队，由阿德伯格（Eric Adelberger）领导的这个小组的名字来自一个文字游戏，而且它的发音像 Eötvös——一位著名的匈牙利引力物理学家。

这个团队利用自己设计的极端精确的仪器检验了引力定律。这个仪器包括一个圆环铝摆，它巧妙地悬挂在两个缓缓旋转的铜质圆盘上方，其中一个圆盘稍厚。圆盘以特定的方式排列，如果引力定律依然成立，它们对铝摆的作用就会相互抵消；相反，如果引力在亚毫米尺度下遵循其他关系，它们对铝



摆的作用会产生净扭矩（让铝摆有旋转的趋势）并让铝摆略微扭曲。

刚开始，研究人员发现铝摆受到微弱的牵引力，似乎违背了引力定律。无论他们如何努力，也无法解释铝摆的运动。最后，团队的一位成员终于找到原因：他们买的悬挂铝摆的光纤贴错了位置，导致在一个方向上铝摆只能移动到设计的 98%。如果考虑这个原因，引力平方反比定律在低至 1/5 毫米（小于 1/100 英寸）的距离内依然正确。接着，研究人员对仪器进行改进，将他们的发现拓展到更微小的范围。

Eöt-Wash 小组的结果让大额外维数的拥护者有些失望。这个团队对牛顿关系的精确证明使得一些最简单的方法出局。不过，迪墨波罗评论道，如果他检验的模型确实可行的话，“现在下结论言之过早”。“更小尺度的实验即将开始”，他迫不及待地指出。¹³

288

另外一个探索维数的小组由美国科罗拉多州大学的普莱斯（John Price）和朗（Joshua Long）领导，他们利用一套与前面不同的装置记录引力的差别。他们没有使用旋转的圆盘，而是用每秒震荡 1000 次的薄薄的钨簧片实验。敏感的电子器件的测量结果说明在低于 1/10 毫米的范围内，引力定律依然成立，这一距离仅仅相当于两根头发丝的宽度。

其他研究者试图测量光速与引力速度的差别。如果找到差异，就可以在一定程度上说明引力子的传播通过“围”空间走了捷径。不过，这样的证据看上去不会很快来临。2003 年，美国密苏里罗拉大学的科佩金（Sergei Kopeikin）和西维吉尼亚的国家射电天文观测台的弗马龙（Ed Fomalont）宣布一项

天文研究结果，即他们发现引力的速度与光速没有差别。

不过，目前测量额外维数的另一项技术只需利用额外维数的紧致性（这里，“紧致”意为它们像圆环一样在有限区域内闭合，但这一区域未必很小）。对于加速器中的粒子，应用海森伯的不确定性原理，在物理空间上的限制将使得它们动量空间的几率范围很大。对于局限于额外维数封闭圆环中的粒子，这依然成立。粒子最终会产生高能谱线，这就像声音在洞穴中不断重复地反射。根据爱因斯坦的说法，能量与质量有关系，这些所谓的卡鲁扎-克莱因模型下的粒子的质量将远大于初始值。它们将处于“态顶”：粒子像阶梯一样排列起来，一个比一个质量大。研究人员希望在加速器数据中找到一些蛛丝马迹，揭示高维世界幽灵般的影响。

研究高维领域最杰出的两位专家之一是理论学家里肯（Joseph Lykken）和实验物理学家思白普路（Maria Spiropulu），他们都在芝加哥大学。他们相信，在某些类型的粒子碰撞过程中，可以找到高能引力子从我们的膜通过“囿”空间逃逸的痕迹。思白普路曾经对与会者说：“引力子是额外维数最具活力的研究对象。”¹⁴

在溜进其他领域之前，这个即将消失的引力子是无法直接观测的。不过，这一过程会产生来源于胶子（传递强相互作用的玻色子）中的强子喷射。这些强子的出现将告之引力子的消失。检测装置记录的数据将会为这个难题不为人知之处提供有益的线索。

2001 年，由布朗大学的兰德伯格（Greg Landsberg）领导的研究小组重新考查了 4 年时间内，在万亿电子伏加速器中

289



FIRST MOVER

第一推动

6000 万个粒子的碰撞数据。他们仔细挖掘堆积如山的陈旧数据，在有记录的所有相互作用中筛选出有可能是引力子消失的数据。唉，不过他们没有挖到遗失的金矿。

很自然，一旦大型强子对撞机项目落成，实验物理学家将排成长队检验不同的高维理论。他们会对已知粒子的卡鲁扎-克莱因模型进行热情研究，也将寻找缺席的引力子的可靠的存在证据。在整个过程中，他们的数据分析都将着眼于超对称伴子，也会紧紧盯住长期以来搜寻的目标——希格斯玻色子。所有奇迹都可能被发现，这实在是实验物理的光辉灿烂的时代。

总结 | 感知额外维数

额外维度物理学是一场正在进行的革命。如果额外维数存在，那么我们可见的宇宙就只不过是块薄片。其余空间都被深深藏匿。

——约瑟夫·里肯，

美国物理学会会议上的演讲

维数革命

在 2003 年美国物理学会的一次会议上，里肯作了一场有关卡鲁扎-克莱因理论与膜世界模型的实验展望报告，标题为《额外维数的神秘性》。对这一领域，目前疑问诸多，但里肯直言不讳的报告却透露出肯定其存在的倾向：“从我的标题来看，好像这是某种超自然现象，但是我希望说服你们这实际上是一场物理学报告。”¹

其实，当实验物理学家毕其一生，试图开启那深深藏匿的

290



额外维度之门时，他们已经普遍相信额外维数的存在。而若干年前，人们抓破头皮也难以发现任何涉及额外维度的实验文献。这些夜以继日的装配检测器，整理碰撞数据的人，听到理论物理学家谈到十、十一或者二十六维宇宙的时候，都会禁不住捧腹大笑。他们暗暗失笑，因为他们可能惊愕，这样一个风马牛不相及的研究，竟然被称为物理，而不属于抽象的哲学范畴。

291

在那个缺乏启蒙的时代，把关于卡鲁扎-克莱因理论的文章提交到主流杂志，发表的几率就像猜中俄罗斯轮盘（一种赌博游戏）一样。只要有一个评审人认为这个方向不切实际，稿子就会被枪毙。科多斯记得他收到过一份裁决性的陈述，“额外维数的相关东西，没有任何根据。只有被证实，这篇文章才可以发表。”²

高维给人的感觉就是这样，所以对于大多数投身高维领域的人，当他们再次审视这种选择，他们会非常苦恼。尽管一开始许多人为高维振奋不已，最终他们会决定回到主流领域。卡鲁扎就是如此，他放弃了五维理论，把精力放在量子化的研究上。而卡鲁扎最后将自己的模型束之高阁，把注意力放在他的教书、写教材和家庭上。尽管爱因斯坦和泡利完全不是传统意义上的思想家，他们的态度也游移不定，甚至持续好几年。爱因斯坦的助手伯格曼和巴格曼一旦踏上自己的道路，也对高维领域置之不理。而在这条充满争议的道路中，信仰的改变比比皆是。

科多斯回忆他的同事阿贝奎斯最终是如何决定关闭高维的盒子的。“那个时候，他离开高维研究，而我继续。他说，‘已

经够了。我不想让人知道我是一个做高维的家伙。我想做些更具体的问题。’因此即使他已经写了一些文章，还与人合著过书，他还是和不相信高维的人站在了一边。”³

考虑到这是一段充满矛盾的编年史，当代弦理论家做得还是比较不错的，他们成功地说服实验界关注他们的想法。之所以获得这样的成功，是因为他们指出了额外维度方法可能解决的所有难题。它们包括层次问题，即为何引力比其他力弱得多；宇宙常数和暗物质的相关问题，即宇宙为何以特定速率加速；如何量子化引力的难题；最后，还有找到自然的统一形式的问题。此外，感谢马德西纳的推断，额外维数模型可能有助于澄清量子色动力学和其他标准规范理论中的某些问题。事实上，人们应该认真对待 M 理论和额外维数方法，它们可能解决所有的这些问题，这足以说明其巨大威力。

292

如果没有方法设计合适的实验检验额外维度的假设，这些理由就无法说明实验室空间与束流时间的正确性。很幸运，研究小组已经一个接一个的证明了它们，从桌面上的设计到庞大的加速器项目。特别是重强子碰撞机，将会为其中一些问题的解决带来很大的希望。当它于 21 世纪初（已于 2007 年建成）并完全运行后，谁知道它能揭开什么样的秘密呢？

科学读物、作品与超空间

万一一切都是真的呢？万一实验表明，卡鲁扎、克莱因和他们的继承者有关隐藏的空间的内凹是真的呢？假设高维本质上被证明可以用一组简单的原理描述物理的方方面面，这个划



时代的发现又会怎样改变我们的文化呢？特别是科学家如何把这样的观点向大众传播，公众曾经把高维与超自然联系在一起，如果他们的想法依然如故怎么办？

科学家用了好几代人的时间，才说服公众地球围绕太阳旋转。当达尔文的提议出现一个半世纪后，一部分公众依然不相信他的说法。人们可能会希望一个宇宙的终极理论能够被完全理解，甚至可能一定程度上在学校传授。但是，因为我们的感官太有限，用具体的方法解释这一课题，将会给教学法带来重大挑战。

人们或许会将解决问题之道诉诸 19 世纪这个课题的先驱们。那个时候，黎曼、凯莱和其他人首次将高维引入数学中。这个超空间的观点通过几何模型、讲座、小说和故事，潜移默化地逐渐进入公众视野。在与策尔纳和其他见神论者的伪科学斗争中，某些高维的粗线的表达需要得到尊重——至少在科学小说的读者中。最终，这些新颖的概念在艺术世界中找到表述方式——比如以未来派或者立体派的方式，这激发了人们对它产生了普遍而深远的关注。

293

诸如 M 理论等十维或者十一维统一模型，在很多方面带来巨大的挑战。在膜与弦中，人们很难去描绘超立方，更别说卡拉比-丘形状或者对偶性。如果这类元素在科学膜的基础中起着关键作用，就需要用独特的教学工具让学生彻底了解它们的结构。据说，威藤在凝视办公室的窗户时，可以在脑海中操作此类结构，但是对于我们这些凡夫俗子，又该怎么办呢？

可能未来的科学课堂会准备虚拟现实的仪器，可以让学生沉浸于超自然的世界中，用户可以操作高维物体的投影，以此

理解它们的结合方式。通过这样的方法，或许就可能让孩子们“感知额外维度”，训练他们的头脑，使之可以解密复杂的几何关系。就像学一门外语，新的一代思想家将游刃有余地理解超空间。

不可能的草图

很幸运，许多计算机图形科学家和艺术家开始铺设超空间教学的地基。他们用功能提升的图形、动画、立体眼镜和其他工具，开创一条道路，让人们看到似乎不可能见得到的东西。就像 Hinton's 高科技公司，他们的目标就是把高维带入现实体验——就像摄影中的慢动作可以让自然的许多方面更加栩栩如生。

这场运动的领导者之一是班考夫，布朗大学的教授。和布朗计算机图形试验室的同事一道，他们开创性地利用运动、投影和透视把高维形状带到人们生活中。许多和他一起工作的学生正在学习，如果超空间物体奇异地搭配在一起，然后旋转不同角度以及贯穿不同平面时，如何描述它们。他的获奖电影有《超立方体：投影和切片》，他和斯特劳斯（Charles Strauss）利用计算机制作了这部电影。班考夫也是研究埃得温·艾博特生平与作品方面的知名学者。

294

一位深受班考夫影响的艺术家是纽约的画家、雕刻家兼建筑师罗宾（Tony Robbin）。罗宾是美术漆画的发明者，他发现了在画布上填充色彩斑斓的几何图案这种愉悦的表达方式。他用一个喷射枪和模板创作了最早的作品，画面的纹理看上去



就像图案化的棉被。

接着，罗宾邂逅了班考夫的多维图像——一个值得纪念的时刻。此时此刻，他迸发出在艺术创作中探索高维的冲动。他回忆道，“接连三个晚上，我频繁地从睡梦中醒来。我梦见班考夫的电脑上的图形：绿色的屏幕，抖动的几何轮廓。看上去，好像这些图形已经镌刻在我的脑海中。我已经直接看到了第四维。终于，这就是我要找的秘密，我需要它实现我的梦想。”⁴

罗宾自学成为一名精湛的程序员，开发了一些最为精致的超空间绘图的程序。他利用这些程序把三维图片结合起来，设计成富有启发性的⁵高维物体。这些物体直接可以观察，亦可借助 3D 眼镜。

另外一名当代艺术家是电影制片人罗斯（Peter Rose）。他建议将时间作为第四维，以空间化的形式表达。在诸如《看得不够远的人》（*The Man Who Could Not See Far Enough*）等电影中，他提出了可以超越我们感官局限的方法，并采取透视式即时体验。他利用时间延迟和其他技术，将过去、当下和未来编织进一幅万花筒式的图中，图片的边缘作为时间轴，以类空的方式表现。

罗斯一开始是从伽莫夫的书《从一到无穷大》以及许许多多著名的科幻小说中知道高维的。他依然记得类似幻觉的体验，他看到“在毛巾的空隙中成千上万的时间延缓的图像”。这启发他完成首批多图效果。

罗斯看中了把高维概念向公众传播的巨大潜力。“计算机动画当然已经具备这一能力，可以让人信服地模拟复杂的多维

行为，”他说，“但是，流行文化中人们找到了最直接的处理方式。《星际旅行》在众多电影中脱颖而出，它紧紧抓住了关于时间、因果律、空间的问题。我可以推断，一般来说许多人都会满意这个数十年前还难以接近的概念。”⁵ 295

事实上，就像海因莱因和多亦奇的时代，科幻小说的构架继续作为一个载体，关于宇宙的杰出的思想可以在其中汇集。现在，有两位最富于想象力的作家拉克和斯图尔特就走的这条路。他们是大学数学教授——这是从艾博特和卡罗尔延续下来的传统，他们寻找各种各样的方法表达观点。

拉克具有多重身份。他既是四维史方面专家，发表这方面的文章和编纂欣顿的作品。同时，他又是复杂性科学的重要贡献者，特别是在细胞自动控制中离散的、自组织的世界。另外，他还是计算机朋克^①运动的发起者之一。这是20世纪末期的一种流派，强调无拘无束的生活方式、奇异的发型以及对计算机文件的艺术鉴别力。

在此运动背景相关的种种被拉克称作“超现实主义”。他吸引了一批忠诚的追随者，将神话般的传说故事编完，这些故事发生的环境设置在不同的宇宙与超空间中。“拉克宇宙”中的居民包括芭布斯，一个性感的超球面，对男人具有不可阻挡的吸引力；还有乔·立方，他是正方形世界一位传说的三维英雄，他奋力进入了一个更高的维度。

拉克对班考夫和罗宾的创作印象深刻，他让他的研究生完成自己的多维模拟。他完全地相信，思想完全有能力理解超越

① 以发匿名电子邮件为乐事的网络迷。



空间的世界。“大脑是难以置信的复杂的信息和联结的网络，”拉克说，“即使大脑本身被限制于三维，但是它没有理由不能构建一个更精确的四维结构的模型或者四维结构的‘动态的影子’。”⁶

另一位作家兼数学家是华威大学的教授斯图尔特，他在有关超空间的学术和小说上皆有作为。斯图尔特是《科学美国人》的专栏作家，并经常活跃于《新科学人》，他刚刚发表了²⁹⁶《平地》的注释版。他为这本书写了续集，叫做《更平之地》(Flutterland)，^①把编年史进行扩展，包括对当代多维理论幽默的介绍。

还有其他一些作家，也成功地告诉大众读者当代弦理论和超空间世界的微妙之处。科学家格林、加来道雄(Michio Kaku)和匹克欧尔(Clifford Pickover)最近的作品在这一主题上做了明晰的指引。连达夫(Michael Duff)都卷入冲突，因为他舞弄笔杆子模仿《平地》，但情节换成了十维的弦理论家向十一维的M理论妥协。⁷如果宇宙确实是额外维度的万花筒，引领读者紧紧抓住“万有理论”将毫无疑问大有裨益。

未来的技术

“终极理论”这个词，让人感到有些沮丧，好像它一旦建立起来，所有的科学都将终止。尽管众所周知的力的统一模型

^① 中文版《二维国内外》(Flutterland)即将由湖南科学技术出版社出版。

是让人震惊的成就，不过，它也无法终结人类的疑问。至少，解释与应用的世纪远不能公正评价物理学家拿到的薪水。

就像一条可能的科研大道——如果我们偶然居住在多维的宇宙——科学家将尝试找到捷径突破结构的限制。这些突破将允许宇宙中的两地迅速地交流甚至相互来往。而信息和/或者材料的输运将以超光速进行，这将为宇宙探险提供说不尽的好处，因为它巧妙地避开了距离太遥远的问题。

空间不同区域之间的几何联系是由爱因斯坦和罗森 1935 年首次提出的。家喻户晓的爱因斯坦-罗森桥，或者虫洞 (wormholes)，是用一个弯曲的狭窄的通道，将两个平坦的流形连接起来。爱因斯坦、罗森以及后来的外尔，都试图利用这些打造粒子理论。

接着，其他研究者诸如加州理工学院的索恩 (Kip Thorne) 推测，经过特别设计的虫洞可以用来星际旅行。如果它们足够大、安全以及稳定的话，就可以作为宇宙中遥远两地通行的快速地铁。

根据多流形宇宙的框架，联结以不同的形式存在。我们世界的材料成分与电磁辐射就会被限制在一种类似“平地”的环境中，而引力子却可以从其他折叠中逃逸。因此引力独自一人垄断了所有捷径。 297

尽管我们自己不可能直接利用这种通道，但是我们可以想象得到整装列队的引力子携带能量和信息通过它们。这些粒子从我们膜的折叠中穿到另外的膜，它们可以在物理空间中巧妙地长距离地旅行。因此，它们也可以非常有效地提供超光速的通讯。



我们首先需要发展可以信赖的引力波的发射装置与接收装置。为了发送信号，发生器要能调制引力信号，后者可以在“囿”空间中自由穿梭。接着，遥远的检测器会把接收的波转化为可读的信息。利用这样的系统，我们可以让两艘相距极端遥远的飞船通信，只要它们彼此“囿”空间的距离不是太大。

很自然的，考虑到当前的技术，实现这样的机制需要走很长的路。此外，它还依赖某类膜世界模型的正确性。不过，梦想一下物理统一理论未来的应用还是很有意思的。起码，它们可以帮助驱散人们对“终极理论”终结科学质疑的忧虑。

卡鲁扎-克莱因的遗产

从柯尼斯堡桥到重强子碰撞机（LHC），从安阿伯的街道到引力子逃逸的小路，我们度过了一个漫长的、奇异的旅途。如果我们的路过于曲折，那是因为我们沿着额外维度蜿蜒盘旋地前进。如果我们遇到的一些理论物理学家，他们看上去心事重重，你可以想象一下如果把你的脑子放在高维空间中，让它成为日常研究的一部分会怎么样。

298

是什么驱使思想家把熟悉的空间界限置之一边，沉思伟大的宇宙？为什么去考虑一幅与我们感知的世界迥异的奇异的图景？传统物理的机会那么多，为何去寻找一些独特的东西？

或许因为人类反感受限制。我们想知道在知识的边缘外面还有什么；“严禁入内”让我们无比厌倦；如果自然只数到三，我们想要数到四、五或者更多。

对卡鲁扎和克莱因而言，他们渴望完整。第五维提供了一

个额外的角落，让自然落脚。为什么当引力在它温暖舒适的时空休憩时，电磁力要被冷落到角落中呢？还有，像克莱因补充说的，实际上量子理论是可以迁徙到更稳固的地方的，为什么它要待在一个模糊的框架中？

现在，理论家们正在尝试为更加庞大的、不同的观点搭建舞台。他们希望砌起一座大厦，可以让电磁力与弱力和谐融洽地一起居住，可以精妙地表达强相互作用，以及引力的几何模型——还有量子理论本身，这说明无论这些力或强或弱，都包容于大厦设计之内。它也需要宽广的基石，可以容得下暗物质、暗能量和其他神秘的要素。这座高耸的城堡是否能冲上无形无迹的新维度的云霄？唯有时间可以掀开藏匿于宇宙中的宏章巨著。

注 释

序言 卡鲁扎-克莱因奇迹

1. Gary Bibbons, "Brane-Worlds", *Science* 287 (January 7, 2000): 49.
2. 与 Stanley Deser 访谈, Brandeis 大学, 2002 年 9 月 22 日。

第 1 章 几何的威力

1. H. G. Wells, 《时间机器》, Seven Science Fiction Novels of H. G. Wells (纽约: 多佛, 1934), p. 4.
2. Diderot 和 Jean D' Alembert, *Encyclopédie ou Dictionnaire Raisonné des Science des Arts et des Métiers*, 卷 4 (斯图加特: 弗罗曼·弗里德里希, 1988), P. 1010.
3. R. C. Archibald, "Time as a Fourth Dimension," *Bulletin of the American Mathematical Society* (May 1914): 409~412.
4. Immanuel Kant, "Thoughts on the True Estimation of Living Forces," in *Kant's Inaugural Dissertation and Early Writings on Space*, John Handyside 翻译 (Chicago: Open Court, 1929), p. 13.

第 2 章 多维空间的景象

1. Eric Temple Bell, *Man of Mathematics* (New York: Simon and Schuster, 1937), p. 221.

2. 出处同上, p. 220.
3. Leonard Mlodinow, *Euclid's Window: The Story of Geometry from Parallel Lines to Hyperspace* (New York: Simon and Schuster, 2001), p. 119
4. Bell, *Men of Mathematics*, p. 497.
5. David Wells, *The Penguin Book of Curious and Interesting Mathematics* (New York: Penguin, 1997), p. 139.
6. J. J. Sylvester 致 Joseph Henry 的信, April 12, 1846. Reprinted in Karen hunger Parshall, James Joseph Sylvester: *Life and Work in Letters* (Oxford: Clarendon Press, 1998), p. 15.
7. James J. Sylvester, "A plea for the Mathematician", *Nature* 1 (December 30, 1869): 238.
8. 在 Sartorius von Waltershausen 所著的高斯传记中, 记载了高斯使用过书虫这一比喻。在数学家 Hermann von Helmholtz 1870 年的讲话中, 类似地提到了生活于一个球面上的二维生物。
9. Sylvester, "A plea for the Mathematician", p. 238.
10. 出处同上。
11. Claude Bragdon, *Four-Dimensional Vistas* (New York: Alfred A. Knopf, 1916), p. 38.
12. Helena P. Blavatsky, *The Secret Doctrine*, vol. 1 (London: Theosophical Publishing Society, 1888), pp. 251~252.
13. C. W. Leadbeater, 在 Alexander Horne, *Theosophy and the Fourth Dimension* (London: Theosophical Publishing Society, 1928) 中被引用, p. vii.
14. Charles Howard Hinton, *The Fourth Dimension* (London: Allen and Unwin, 1904), p. 207
15. John Stegall, 在 Thomas Hinde 的作品 *Carpenter's Children: The Story of the City of London School* (London: James and James, 1994) 中被引用, p. 66
16. Edwin Abbott Abbott, *Flatland: A Romance of Many Dimensions* (London: Seeley and Co., 1884), p. ii.
17. Rudy Rucker, *The Fourth Dimension* (Boston: Houghton Mifflin, 1984), p. 11.
18. Abbott, *Flatland*, p. ii.
19. 出处同上。
20. James E. Beichler, "The Psi-ence Fiction of H. G. Wells", YGGDRASIL: The Journal of Paraphysics. <http://ourworld.compuserve.com/homepages/Paraphys/psifi.htm>, pp. 3~4



FIRST MOVER

第一推动

21. S. (pseudonymous author), "Four-Dimensional Space", *Nature* 31 (March 26, 1885): 481.
22. Bernard Bergonzi, *The Early H. G. Wells: A study of the Scientific Romances* (Manchester, England: Manchester University Press, 1969), p. 3
23. H. G. Wells, "The Plattner Story", H. G. Wells 28 篇科普故事之一, (New York: Dover, 1952), p. 444
24. Wells, "The Time Machine", p. 5.
25. 出处同上, p. 4.
26. Simon Newcomb, "Modern Mathematical Thought", *Nature* 49 (February 1, 1894): 328~329.

第3章 物理学家的里程碑——电、磁和光的统一

1. James Clerk Maxwell, "Lines written under the conviction that it is not wise to read mathematics in November after one's fire is out", reprinted in Lewis Campbell and William Garnett, *The Life of James Clerk Maxwell* (London: Macmillan and Co., 1882), pp. 622~625.
2. James Clerk Maxwell, "Report on Tait's lecture on force", reprinted in Campbell and Garnett, *The Life of James Clerk Maxwell*, p. 647.
3. James Clerk Maxwell, "A Paradoxical Ode", reprinted in Campbell and Garnett, *The Life of James Clerk Maxwell*, pp. 649~650.
4. Albert Einstein, Autobiographical Notes, trans. and ed. Paul Arthur Schilpp, (La Salle, Ill.: Open Court, 1979), p. 49.
5. Peter Galison, "Minkowski's Space-Time: From Visual Thinking to the Absolute World", in *Historical Studies in the Physical Sciences*, vol. 10, ed. Russell McCormmach, Lewis Pyenson, and Roy Steven Turner (Baltimore: Johns Hopkins, 1979)
6. Henri Poincaré, "Science and Hypothesis", in *The Value of Science: Essential Writings of Henri Poincaré*, ed. Stephen Jan Gould (New York: Modern Library, 2001), p. 48.
7. Henri Poincaré, "Science and Method", in *The Value of Science*, p. 438
8. Hermann Minkowski, 1908年9月21日在德国自然科学家与物理学家集会上的致辞。
9. 阿尔伯特·爱因斯坦三年的课程总结报告, 1898~1899, in *The Collected Papers of Albert Einstein*, vol. 1, John Stachel ed., and Anna Beck, trans. (Prin-

ceton, N. J. : Princeton University Press, 1995), p. 27.

10. Barry Parker, *Einstein's Dream: The Search for a Unified Theory of the Universe* (New York: Plenum, 1986), p. 31

11. Einstein, *Autobiographical Notes*, p. 15

12. Abraham Pais, *Subtle Is the Lord: The Science and the Life of Albert Einstein* (New York: Oxford University Press, 1982), p. 152.

13. Dennis Overbye, *Einstein in Love* (New York: Viking, 2000), p. 160.

14. Albert Einstein and Jakob Laub, "Über die elektromagnetischen Grundgleichungen für bewegte Körper", *Annalen der Physik* 26 (1908): 532; 被 John Stachel 翻译并引用, *Einstein from "B" to "Z"* (Boston: Birkhäuser, 2002), p. 160.

15. Overbye, *Einstein in Love*, p. 160

16. Albert Einstein 致 Arnold Sommerfeld 的信, July 1910, in *The Collected Papers of Albert Einstein*, vol. 1, Robert Schulmann, ed., and Robert Schulmann, eds., and Anna Beck, trans. (Princeton, N. J. : Princeton University Press, 1995), p. 157.

17. Albert Einstein, "The Theory of Relativity", 在苏黎世 Naturforschende Gesellschaft 会议上作的演讲, January 16, 1911, in *The Collected Papers of Albert Einstein*, vol. 3, A. J. Kox, Martin J. Klein, and Robert Schulmann, eds., and Anna Beck, trans. (Princeton, N. J. : Princeton University Press, 1993), p. 350.

18. Einstein 致 A. Kleiner 的信, April 3, 1912.

19. Albert Einstein and Leopold Infeld, *The Evolution of Physics* (New York: Simon and Schuster, 1938), p. 207.

20. 与 Gerald Holton 的谈话, Harvard University, November 22, 2002.

21. Paul M. Laporte, *Cubism and Relativity* (With a Letter of Albert Einstein), *Art Journal* 25 (1966): 246.

第4章 完善重力

1. Stachel, *Einstein from "B" to "Z"* (Boston: Birkhäuser, 2002), p. 262.

2. Louis Kollross, "Albert Einstein en Suisse-Souvenirs", *Fünfzig Jahre Relativitätstheorie* (Bern, 11~16 July 1955), *Helvetica Physica Acta, Supplementum IV* (1956): 274~275.

3. Albert Einstein 致 C. Seelig 的信, May 5, 1952, quoted in Albrecht Fölsing, *Albert Einstein*, Ewald Osers, trans. (New York: Penguin, 1997), p. 296



4. Albert Einstein and A. D. Fokker, "Die Nordströmsche Gravitationstheorie vom Standpunkt des absoluten Differentialkalküls", *Annalen der Physik IV Folge*, 44 (1914).

5. Albert Einstein 致 Michele Besso 的信, December 10, 1915, in Albert Einstein-Michele Besso, *Correspondance*, Pierre Speziali, ed. (Paris: Hermann, 1972), p. 59.

6. John Wheeler 访谈, Princeton University, November 5, 2002.

7. Eva Isaksson, "Gunnar Nordström: On Gravitation and Relativity" (文章在 1985 年 8 月, 伯克利加利福尼亚的 17 届科学史会议上发表。).

8. Thomas Appelquist, Alan Chodos, and Peter Freund, *Modern Kaluza-Klein Theories* (Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1987), p. 52

9. Gunnar Nordström, "On the possibility of a Unification of the Electromagnetic and Gravitational Fields", *Phys. Zeitsch.* 15 (1914): 504, trans. Peter Freund; in Appelquist, Chodos, and Freund, *Modern Kaluza-Klein Theories*, p. 52.

10. 出处同上。

11. Paul Ehrenfest, *Research Notebook*, Museum Boerhaave, Leiden.

12. Martin J. Klein, Paul Ehrenfest; *The Making of a Theoretical Physicist* (London: North-Holland, 1970), p. 309.

13. 出处同上。

14. John Stachel 访谈, Boston University, July 30, 2002.

15. Paul Ehrenfest, "In what way does it become manifest in the fundamental laws of physics that space has three dimensions?" *Proceedings of the Royal Academy* (Amsterdam), 20 (1917): 200~209.

16. 电话访谈, Martin J. Klein, September 11, 2002.

17. Hermann Weyl 致 Albert Einstein 的信, March 1, 1918, in *The Collected Papers of Albert Einstein*, vol. 8, Robert Schulmann and A. J. Kox, eds. and Ann Hentschel, trans. (Princeton, N. J.: Princeton University Press, 1995).

18. Albert Einstein 致 Hermann Weyl 的信, March 8, 1918, 出处同上。

19. 出处同上。

20. Albert Einstein 致 Hermann Weyl 的信, April 8, 1918, 出处同上, p. 522.

21. Hermann Weyl 致 Albert Einstein 的信, May 19, 1918, 出处同上, p. 562.

22. Albert Einstein 致 Hermann Weyl 的信, November 29, 1918, 出处同上, p. 699.

23. Hermann Weyl 致 Albert Einstein 的信, December 20, 1918, 出处同上, p. 709.

第 5 章 奏响第五根弦: 卡鲁扎非凡的发现

1. Daniela Wünsch, 私人通信, July 16, 2002.
2. Daniela Wünsch, "Theodor Kaluza: Leben und Werk (Life and Work)," vol. 1 (ph. D. diss., University of Stuttgart, 2000), p. 127.
3. 出处同上, p. 24.
4. 出处同上, p. 11.
5. Varadaraja V. Raman, "Theodor Kaluza", in Charles Gillespie, ed., *Dictionary of Scientific Biography* (New York: Scribner, 1970), p. 212.
6. Theodor Kaluza, Jr., *Erinnerungen* (Remembrances), University of Hannover Mathematics Department reprint (1990), p. 24.
7. Wünsch, "Theodor Kaluza", p. 70.
8. 出处同上, p. 66.
9. Kaluza, *Erinnerungen*, p. 24
10. Martin Kneser 访谈, Göttingen, January 8, 2003.
11. Varadaraja V. Raman, "Theodor Kaluza", in Gillespie, *Dictionary of Scientific Biography*, p. 212.
12. Kaluza, *Erinnerungen*, p. 24
13. 出处同上.
14. Daniela Wünsch, "Einstein, Kaluza and the Fifth Dimension" (在 2002 年 7 月 26~29 日, 第六届广义相对论历史会议上的讲话.)
15. Theodor Kaluza, Jr., Interview on "NOVA: What Einstein Never Knew", 1985 年 10 月 22 日首次广播。
16. Theodor Kaluza, "On the Unity Problem of Physics", trans. Peter Freund, T. Muta, and C. Hoensalaers, reprinted in Thomas Appelquist, Alan Chodos, and Peter Freund, *Modern Kaluza-Klein Theories* (Reading, Mass.: Addison Wesley, 1987), p. 61.
17. 出处同上, p. 62.
18. Albert Einstein 致 Theodor Kaluza 的信, April 21, 1919, trans. C. Hoensalaers, in Venzo De Sabbata and Ernst Schmutzer, eds, *Unified Field Theories of More than four Dimensions* (Singapore: World Scientific, 1983), p. 449.
19. Albert Einstein 致 Theodor Kaluza 的信, April 28, 1919, 出处同上,



p. 451.

20. Albert Einstein 致 Theodor Kaluza 的信, October 14, 1921, 出处同上, p. 451.

21. Kaluza, "On the Unity Problem of Physics", p. 68.

22. Albert Einstein 致 Hermann Weyl 的信, June 6, 1922 (Einstein Archives).

23. Albert Einstein 致 Paul Ehrenfest 的信, August 18, 1925 (Einstein Archives).

24. Theodor Kaluza 致 Albert Einstein 的信, February 6, 1925 (Einstein Archives).

25. Albert Einstein 致 Theodor Kaluza 的信, February 27, 1925, in *Unified Field Theories*, p. 457.

26. Einstein 致 Karl Herzfeld 的信, probably January 1927 (Einstein Archives).

27. Albert Einstein 寄给 Paul Ehrenfest 的明信片, September 3, 1926 (Einstein Archives).

第6章 克莱因的量子奥德赛

1. Stanley Deser 访谈, Brandeis University, November 22, 2002.

2. Oskar Klein, "From My Life of Physics", reprinted in *Oskar Klein Memorial Lectures*, vol. 1 (Singapore: World Scientific, 1989), p. 106.

3. Stanley Deser 访谈, Brandeis University, November 22, 2002.

4. Niels Bohr, quoted by Edward Teller in S. Rozental, ed., *Niels Bohr* (New York: Wiley, 1967), p. 103.

5. Klein, "From My Life of Physics", p. 107.

6. Oskar Klein, John L. Heilbron 和 Léon Rosenfeld 访谈, Copenhagen, February 20, 1963.

7. John Stachel, "Einstein and 'Zweistein'", in John Stachel, *Einstein from "B" to "Z"* (Boston: Birkhäuser, 2002), p. 540.

8. Oskar Klein, *Kosmos* 37 (1959): 9.

9. Abraham Pais, "Glimpses of Oskar Klein as Scientist and Thinker", in *Proceedings of the Oskar Klein Centenary Symposium*, Ulf Lindström, ed. (Singapore: World Scientific, 1995), p. 8.

10. Klein, 与 Heilbron and Rosenfeld 访谈.

11. Klein, "From My Life of Physics", p. 108.
12. 出处同上, p. 111.
13. Klein, 与 Heilbron and Rosenfeld 访谈.
14. Abraham Pais, *Subtle Is the Lord: The Science and the Life of Albert Einstein* (New York: Oxford University Press, 1982), p. 332.
15. George Uhlenbeck, 与 Thomas S. Kuhn 访谈, Rockefeller Institute, April 5, 1962.
16. Paul Ehrenfest 致 Albert Einstein 的信, August 26, 1926 (Einstein Archives).
17. Werner Heisenberg, in Rozental, *Niels Bohr*, p. 103.
18. Albert Einstein 致 Max Born 的信, December 4, 1926, in *Albert Einstein-Max Born, Briefwechsel (Correspondence)*, Max Born, ed. (Munich, 1969), p. 129.
19. Oskar Klein 致 Paul Ehrenfest 的信, March 1930, Archives for the History of Quantum Physics.
20. Paul Ehrenfest 致 Oskar Klein 的信, March 19, 1930.
21. Oskar Klein, "On Political Quantization", 提交给 *Journal of Nuclear Physics* 的未发表的文章 (1935; Niels Bohr Archives).
22. Oskar Klein, 采访 Thomas S. Kuhn 和 John L. Heilbron, Copenhagen, July 16, 1963.
23. 出处同上。
24. 出处同上。
25. Heinrich Mandel 致 Oskar Klein 的信, December 4, 1928 (Niels Bohr Archives)
26. Abraham Pais, "Glimpses of Oskar Klein as Scientist and Thinker", in Lindström, *Proceedings of the Oskar Klein Centenary Symposium*, p. 14.

第 7 章 爱因斯坦的两难

1. Albrecht Fölsing, *Albert Einstein*, Ewald Osers, trans. (New York: Penguin, 1997), p. 637.
2. Albert Einstein 致 the Lebach family 的信, January 16, 1931, *ibid.*, p. 636.
3. Charles Chaplin, *My Autobiography* (New York: Simon and Schuster, 1964), p. 3210.



4. 出处同上, p. 252.
5. 出处同上, p. 321.
6. 出处同上。
7. Albert Einstein, "Issac Newton", *Nature* 119 (1927): 467; *Science* 65 (1927): 347.
8. Fölsing, Albert Einstein, p. 637
9. Albert Einstein 致 Niels Bohr 的信, May 2, 1920, in Banesh Hoffman with Helen Dukas, *Albert Einstein: Creator and the Rebel* (New York: Viking, 1972), p. 178.
10. 出处同上。
11. Albert Einstein 给 Besso 的明信片, May 1, 1926, in *Albert Einstein-Michele Besso, Correspondance, Pieree speciali*, ed. (Paris: Hermann, 1972).
12. Albert Einstein 致 Vero and Bice Besso 的信, March 21, 1955, in Fölsing, *Albert Einstein*, p. 741.
13. Albert Einstein 致 Paul Ehrenfest 的信, January 11, 1927 (Einstein Archives).
14. Ruth Moore, *Niels Bohr: The Man and the Scientist* (London: Hodder and Stoughton, 1967), p. 164.
15. W. Heisenberg, in *Niels Bohr: A Centenary Volume*, A. P. French and P. J. Kennedy, eds. (Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 1985), pp. 170~171.
16. Albert Einstein 致 Paul Ehrenfest 的信, January 21, 1928 (Einstein Archives).
17. "Einstein Extends Relativity Theory", *New York Times*, January 11, 1929, p. 1.
18. "Einstein Distracted by Public Curiosity; Seeks Hiding Place", *New York Times*, February 4, 1929, p. 1.
19. Richard Tolman 致 Paul Ehrenfest 的信, January 27, 1931 (Ehrenfest Archives)
20. Albert Einstein and Leopold Infeld, *The Evolution of Physics* (New York: Touchstone, 1967), p. 310.
21. Albert Einstein and Walther Mayer, "Einheitliche Theorie von Gravitation und Elektrizität [Unified Field Theory of Gravitation and Electricity]", *Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin* (1931), p. 541; in Fölsing, *Albert Einstein*, p. 648.

22. Wolfgang Pauli, review of *Ergebnisse der exakten Naturwissenschaften*, 10, Band, *die Naturwissenschaften* 20, pp. 186~187, in John Stachel, *Einstein* (New York: Oxford University Press, 1982), p. 347.

23. Albert Einstein 致 Wolfgang Pauli 的信, January 22, 1932, in Abraham Pais, *Subtle Is the Lord: The Science and the Life of Albert Einstein* (New York: Oxford University Press, 1982), p. 347.

24. Fölsing, *Albert Einstein*, p. 649.

25. Albert Einstein 致 Abraham Flexner 的信, July 30, 1932, in Pais, *Subtle Is the Lord*, p. 493.

26. Chaplin, *My Autobiography*, p. 322.

27. Gerald Holton 访谈, Harvard University, November 22, 2002.

28. 与 Martin J. Klein 的电话访谈, September 11, 2002.

29. Paul Ehrenfest 致 Richard Tolman 的信, February 3, 1931 (Archives for the History of Quantum Physics).

30. 与 Martin J. Klein 的电话访谈, September 11, 2002.

第 8 章 被放逐的真理——在普林斯顿创建理论

1. Oswald Veblen 致 Albert Einstein 的信, October 28, 1931 (Einstein Archives).

2. Banesh Hoffmann, interview with Albert Tucker, "The Princeton Mathematics Community in the 1930s", October 13, 1984, transcript no. 20.

3. Banesh Hoffmann 致 Albert Einstein 的信, February 11, 1932 (Einstein Archive).

4. Banesh Hoffmann, "Reminiscences", in *Albert Einstein: Historical and Cultural Perspectives*, Gerald Holton and Yehuda Elkana, eds. (Princeton, N. J.: Princeton University Press, 1982), p. 401.

5. Ernest Bergmann, 私人通信, December 25, 2002.

6. 出处同上。

7. 与 Engelbert Schucking 的电话访谈, December 9, 2002.

8. John R. Klauder, "Valentine Bargmann", *Biographical Memoirs* (Washington, D. C.: National Academy Press, 1999), p. 38.

9. Peter Bergmann 致 Albert Einstein 的信, March 14, 1936 (Einstein Archives).

10. Max Bergmann 致 Albert Einstein 的信 December 31, 1940 (Max Berg-



mann Archives).

11. Jamie Sayen, *Einstein in America* (New York: Crown, 1985), p. 147.
12. John Wheeler 访谈, Princeton University, November 5, 2002.
13. Banesh Hoffmann, "Working with Einstein", in *Some Strangeness in the Proportion: A Centennial Celebration to Honor the Achievements of Albert Einstein*, Harry Woolf, ed. (New York: Addison-Wesley, 1980), pp. 476~477.
14. Peter Bergmann, "Reminiscences", in Holton and Elkana, *Albert Einstein*, p. 398.
15. 和 Peter Bergmann 的电话访谈, June 27, 2002.
16. Valentine Bargmann, "Working with Einstein", in Woolf, *Some Strangeness in the Proportion*, p. 488.
17. Nathan Rosen, "Reminiscences", 出处同上, p. 406.
18. Oskar Klein, 与 Thomas S. Kuhn 和 John L. Heilbron 的访谈, Copenhagen, July 16, 1963.
19. Banesh Hoffmann, "Working with Einstein", p. 476.
20. 出处同上, p. 477.
21. Peter Bergmann, *Introduction to the Theory of Relativity* (New York: Prentice-Hall, 1942), p. 272.
22. Albert Einstein and Peter Bergmann, "On a Generalization of Kaluza's Theory of Electricity", *Annals of Mathematics* 39 (1938): 683.
23. Wolfgang Pauli 致 Albert Einstein 的信, September 6, 1938, in Wolfgang Pauli, *Wissenschaftlicher Briefwechsel (Scientific Correspondence)*, vol. 2, 1930~1939, A. Hermann, K. v. Meyenn, and V. F. Weisskopf, eds. (Berlin: Springer, 1985), p. 598.
24. Albert Einstein 致 Wolfgang Pauli 的信, September 19, 1938, 出处同上, p. 601.
25. Jeroen van Dongen, "Einstein and the Kaluza-Klein Particle", *Studies in the History and Philosophy of Modern Physics* 33 (2002): 185.
26. Albert Einstein, Peter Bergmann, and Valentine Bargmann, "On the Five Dimensional Representation of Gravitation and Electricity", *Theodore von Kármán Anniversary Volume* (Pasadena: California Institute of Technology, 1941), pp. 224~225.
27. Léon Rosenfeld 致 Friedrich Herneck 的信, 1962, in F. Herneck, *Einstein und sein Weltbild* (Berlin: Buchverlag der Morge, 1976), p. 280.
28. Robert P. Crease and Charles C. Mann, *The Second Creation* (New York:

Collier Books, 1986), p. 169.

29. Peter Bergmann 致 Albert Einstein 的信, August 15, 1938 (Einstein Archives).

第 9 章 美丽新世界——在灾祸连绵的年代追寻统一

1. 与 Stanley Deser 的访谈, Brandeis University, November 22, 2002.

2. 出处同上。

3. Abdus Salam, “Nobel Prize Lecture”, December 8, 1979.

4. David J. Gross, “Oskar Klein and Gauge Theory” (talk presented at the Oskar Klein Centenary Symposium, Stockholm, Sweden, 1994).

5. 与 Stanley Deser 的访谈, Brandeis University, November 22, 2002.

6. Albert Einstein 致巴伐利亚科学院主席的信, April 21, 1933, in Albert Einstein, *Ideas and Opinions*, Sonja Bargmann, trans. (New York: Bonanza Books, 1954), pp. 210~211.

7. Max Pinl and Lux Furtmüller, “Mathematicians Under Hitler”, *Leo Baeck Yearbook*, Robert Weltsch, ed. (London: Secker and Warburg, 1973), p. 133.

8. Daniela Wünsch, “Theodor Kaluza: Leben und Werk (Life and Work)”, vol. 2 (PhD diss., University of Stuttgart, 2000), p. 57.

9. 出处同上, pp. 59~61.

10. 出处同上, pp. 72~74.

11. Theodor Kaluza and Georg Joos, *Höhere Mathematik für den Praktiker* (Leipzig: Barth, 1938).

12. Wünsch, “Theodor Kaluza”, p. 75.

13. 出处同上, p. 86.

14. 与 Gerald Holton 的访谈, Harvard University, November 22, 2002.

15. Albert Einstein 致 Vern O. Knudson 的信, June 1, 1940 (Einstein Archives).

16. Ernest Bergmann, 私人通信, December 25, 2002.

17. Steven Weinberg, quoted in Dennis Overbye, “Obituary for Peter Bergmann”, *New York Times*, October 23, 2002.

18. Lee Iacocca, *Iacocca: An Autobiography* (New York: Bantam, 1985), pp. 21~22.

19. Ernest Bergmann, 私人通信, December 25, 2002.

20. Al McLennan, “History of the Physics Department”, Lehigh University,



<http://www.physics.lehigh.edu/resources/history.pdf>.

21. John R. Klauder, "Valentine Bargmann", *Biographical Memoirs* (Washington, D. C. : National Academy Press, 1999), p. 38.

22. Phone interview with Kenneth Ford, November 2002.

23. Engelbert Schucking, "Jordan, Pauli, Politics, Brecht, and a Variable Gravitational Constant", *Physics Today*, October 1999, p. 26.

24. 与 Stanley Deser 的访谈, Brandeis University, November 22, 2002.

25. 出处同上。

26. Abraham Pais, *Subtle Is the Lord: The Science and the Life of Albert Einstein* (New York: Oxford University Press, 1982), p. 350.

27. Abraham Pais, "Wolfgang Ernst Pauli", *The Genius of Science* (New York: Oxford University Press, 2000), p. 216.

28. Freeman Dyson, "Another Visit with Wolfgang Pauli", *Physics Today*, August 2001, p. 11.

29. John Stachel, "Einstein and 'Zweistein'", in *Einstein from "B" to "Z"* (Boston: Birkhäuser, 2002), p. 545.

30. Karl von Meyenn and Engelbert Schucking, "Wolfgang Pauli", *Physics Today*, (February 2001): 43.

31. Albert Einstein and Wolfgang Pauli, "On the Non-Existence of Regular Stationary Solutions of Relativistic Field Equations", *Annals of Mathematics* 44 (April 1943): 13.

32. Albert Einstein, *Autobiographical Notes*, Paul Arthur Schilpp, trans. and ed. (La Salle, Ill. : Open Court, 1949), p. 85.

33. 与 John Wheeler 的访谈, Princeton University, November 5, 2002.

34. Engelbert Schucking, "Jordan, Pauli, Politics, Brecht, and a Variable Gravitational Constant", *Physics Today*, October 1999, p. 27.

35. 出处同上, p. 28.

36. Peter Bergamnn, "Unified Field Theory with Fifteen Field Variables", *Annals of Mathematics* 49, no. 1 (January 1948): 255.

37. Wolfgang Pauli 致 Pascual Jordan 的信, March 23, 1948, reprinted in Wolfgang Pauli, *Wissenschaftlicher Briefwechsel (Scientific Correspondence)*, vol. 3, 1940~1949, A. Hermann, K. v. Meyenn and V. F. Weisskopf, eds. (Berlin: Springer, 1985), p. 516.

38. Pascual Jordan, Jr., 致 Daniela Wünsch 的信, December 19, 1996, reported in Wünsch, "Theodor Kaluza", vol. 2, p. 111.

39. Schucking, "Jordan, Pauli, Politics, Brecht", p. 28.
40. W. H. McCrea, "Jordan's Cosmology", *Nature* 172, no. 4366 (July 4, 1953): 3~4.
41. Hans Reichenbach, *The Philosophy of Space and Time* (New York: Dover, 1957), pp. 281~282.
42. F. Rahaman, S. Chakraborty, N. Begum, M. Hossain, and M. Kalam, "A Study of Four and Higher-Dimensional Cosmological Models in Lyra Geometry", *Fizika B* 11 (2002): 57.
43. Dieter von Reeken, 私人通信, December 16, 2002.
44. Wolfgang Pauli 致 Pascual Jordan 的信, March 5, 1952, reprinted in Pauli, *Wissenschaftlicher Briefwechsel*, (*Scientific Correspondence*), vol. 4, part 1, 1950~1952, p. 568.
45. John R. Smythies, "Minds and Higher Dimensions", *Journal of the Society for Psychical Research* 55, no. 812 (1952).
46. John R. Smythies, 私人通信, December 20, 2002.
47. John R. Smythies, "Space, Time and Consciousness", *Journal of Consciousness Studies* 10, no. 3 (2003): 47~56.
48. Lovecraft, "The Dunwich Horror", in *The Best of H. P. Lovecraft* (New York: Ballantine Books, 1982), p. 132.
49. H. P. Lovecraft, "Through the Gates of the Silver Key", *Weird Tales* 24, no. 1 (July 1934): 60.
50. H. P. Lovecraft, "The Dream in the Witch House", in *The Best of H. P. Lovecraft*, p. 297.
51. Madeleine L' Engle, *A Wrinkle in Time* (New York: Scholastic Books, 1962), p. 94.

第 10 章 规范弱力和强力

1. John Archibald Wheeler with Kenneth Ford, *Geons, Black Holes and Quantum Foam: A life in Physics* (New York: Norton, 1998), p. 168.
2. Robert P. Crease and Charles C. Mann, *The Second Creation* (New York: Collier Books, 1986), p. 138.
3. Hans Bethe, "Quantum Theory", *Reviews of Modern Physics* 71, no. 2 (1999): S 4.
4. 与 Engelbert 的电话访谈, December 9, 2002.



5. Joshua Goldberg, "Peter Bergmann" (talk presented at the American Physical Society, April 5, 2003).
6. Ernest Bergmann, 私人通信, December 25, 2002.
7. Albert Einstein, report to the National Science Foundation, April 18, 1954.
8. Jagdish Mehra and Kimball A. Milton, *Climbing the Mountain: The Scientific Biography of Julian Schwinger* (Oxford: Oxford University Press, 2000), p. 640.
9. 与 Bryce DeWitt 的电话访谈, December 4, 2002.
10. 出处同上。
11. 与 Stanley Deser 的访谈, Brandeis University, November 22, 2002.
12. 出处同上。
13. 与 John Wheeler 的电话访谈, Princeton University, November 5, 2002.
14. Albrecht Fölsing, *Albert Einstein*, Ewald Oses, trans. (New York: Penguin, 1997), pp. 739~740.
15. Daniela Wünsch, "Theodor Kaluza: Leben und Werk (Life and Work)", vol. 2 (PhD diss., University of Stuttgart, 2000), pp. 140~141.
16. Helen Dukas 致 Abraham Pais 的信, April 30, 1955, quoted in Abraham Pais, *Subtle Is the Lord: The Science and the Life of Albert Einstein* (New York: Oxford University Press), in *Proceedings of the Oskar Klein Centenary Symposium*, Ulf Lindström, ed. (Singapore: World Scientific, 1982), p. 332.
17. 与 Stanley Deser 的访谈, Brandeis University, November 22, 2002.
18. Stanley Deser, "Oskar Klein: From His Life and Physics", in *Proceedings of the Oskar Klein Centenary Symposium*, Ulf Lindström, ed. (Singapore: World Scientific, 1995), p. 50.
19. 与 Stanley Deser 的访谈, Brandeis University, November 22, 2002.
20. S. Goudsmit, editorial, *Physical Review Letter* 3, no. 11 (1959): 505.
21. 与 Bryce DeWitt 的电话访谈, December 4, 2002.
22. 出处同上。
23. Lecture Notes by Bryce DeWitt, 1963, Les Houches Summer School, reprinted in Thomas Appelquist, Alan Chodos, and Peter Freund, *Modern Kaluza-Klein Theories* (Reading, Mass: Addison-Wesley, 1987), p. 114.
24. 与 Bryce DeWitt 的电话访谈, December 4, 2002.
25. 与 Stanley Deser 的访谈, Brandeis University, November 22, 2002.
26. Deser, "Oskar Klein", p. 53.
27. Abdus Salam 致 Oskar Klein 的信, January 18, 1965 (Niels Bohr

Archive).

28. Oskar Klein 致 Abdus Salam 的信, June 12, 1969 (Niels Bohr Archive).

29. Michael J. Duff, "A Tribute to Abdus Salam" (talk presented at the Workshop on Frontiers in Field Theory, Quantum Gravity and String Theory, Puri, India, December 12~21, 1996).

第 11 章 被弦紧束的超空间包裹

1. Howard Georgi, quoted in Robert P. Crease and Charles C. Mann, *The Second Creation* (New York: Collider Books, 1986), p. 417.

2. Sheldon Glashow, interview on "NOVA: What Einstein Never Knew", originally broadcast October 22, 1985.

3. Claud Lovelace, 私人通信, July 17, 2003.

4. John H. Schwarz, "Reminiscences of Collaborations with Joël Scherk" (talk presented at Conférence anniversaire du LPT-ENS (2000), Caltech preprint, p. 5.

5. Claud Lovelace, 私人通信, July 17, 2003.

6. 与 Bernard Julia 的访谈, ENS, Paris, January, 13, 2003.

7. 与 Eugene Gremmer 的访谈, ENS, Pairs, January 13, 2003.

8. "Edward Witten", *Brandies Review* (Summer 1999): 26.

9. 与 Bernard Julia 的访谈, ENS, Pairs, January 13, 2003.

10. Bernard Julia, 私人通信, July 30, 2003.

11. 与 Bernard Julia 的访谈, ENS, Pairs, January 13, 2003.

12. 与 Stanley Deser 的访谈, Brandies University, November 22, 2002.

13. 与 Bernard Julia 的访谈, ENS, Pairs, January 13, 2003.

14. 与 Stanley Deser 的访谈, Brandies University, November 22, 2002.

15. 与 Bernard Julia 的访谈, ENS, Pairs, January 13, 2003.

16. 与 Stanley Deser 的访谈, Brandies University, November 22, 2002.

17. John H. Schwarz, "Reminiscences of Collaborations with Joël Scherk", p. 5.

18. 与 Eugene Gremmer 的访谈, ENS, Paris, January 13, 2003.

19. Michio Kaku, *Hyperspace: A Scientific Odyssey through Parallel Universes, Time Warps and the Tenth Dimension* (New York: Oxford University Press, 1994), pp. 104~105.

20. 与 Alan Chodos 的电话访谈, September 11, 2002.

21. Edward Witten, "Search for a Realistic Kaluza-Klein Theory", reprinted in Thomas Appelquist, Alan Chodos, and Peter Freund, *Modern Kaluza-Klein Theo-*



ries (Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1987), p. 282.

22. Barry Parker, *The Search for a Supertheory: From Atoms to Superstrings* (New York: Plenum, 1987), p. 247.

23. Michael J. Duff, "A Layman's Guide to M-Theory" (talk presented at the Abdus Salam Memorial Meeting, ICTP, Trieste, Italy, November 1997).

24. Sheldon Glashow, in *Seventh Workshop on Grand Unification*, J. Arafune, ed. (Philadelphia: World Scientific, 1987), p. 548.

25. Richard Feynman, in *Superstrings: A Theory of Everything?* P. C. W. Davies and J. Brown eds., (New York: Cambridge University Press, 1988), p. 193.

26. Albert Einstein, quoted by Peter G. Bergmann, "The Quest for Unity: General Relativity and Unitary Field Theories", in *To Fulfill a Vision: Jerusalem Einstein Centennial Symposium on Gauge Theories and Unification of Physical Forces*, Yuval Ne'eman, ed. (Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1981), p. 20.

27. Michael J. Duff, "A Layman's Guide to M-Theory."

28. 出处同上。

第 12 章 膜世界与平行宇宙

1. Kaey Davidson, "Parallel Universe Theory Not Just Sci-Fi", *San Francisco Examiner*, July 24, 2000, p. A1.

2. Savas Dimopoulos, 私人通信, December 16, 2002.

3. Jeffrey Harvey, quoted in George Johnson, "Almost in Awe, Physicists Ponder 'Ultimate' Theory", *New York Times*, September 22, 1998, p. D1.

4. 出处同上。

5. Burt Ovrut, quoted in George Johnson, "A Passion for Physical Realms, Minute and Maasive", *New York Times*, February 20, 2001, p. D1.

6. 与 Raman Sundrum 的电话访谈, December 3, 2002.

7. 与 Gary Gibbons 的访谈, Cambridge University, January 15, 2003.

8. 出处同上。

9. 与 Lisa Randall 的访谈, Harvard University, November 22, 2002.

10. 与 Paul Steinhardt 的访谈, Princeton University, November 5, 2002.

11. 与 Lisa Randall 的访谈, Harvard University, November 22, 2002.

12. 与 Raman Sundrum 的电话访谈, December 3, 2002.

13. Savas Dimopoulos, 私人通信, December 16, 2002.

14. Maria Spiropulu, "In Search of Extra Dimensions" (talk presented at the AAAS Annual Meeting, Boston, February 17, 2002).

总结 感知额外维数

1. Joseph Lykken, "Mysteries of Extra Dimensions" (talk presented at the American Physical Society Annual Meeting, Philadelphia, April, 5, 2003).

2. Phone interview with Alan Chodos, September 11, 2002.

3. 出处同上。

4. Tony Robbin, *Fourfield: Computers, Art and the Fourth Dimension* (Boston: Bulfinch Press, 1992, p. 25).

5. Peter Rose, 私人通信, December 15, 2002.

6. Rudy Rucker, foreword, in Robbin, *Fourfield*, p. 11.

7. Michael J. Duff, "The World in Eleven Dimensions: A Tribute to Oskar Klein", Oskar Klein 的教授就职演讲, University of Michigan, March 16, 2001.

致 谢

我想感谢 John Simon Guggenheim Memorial 基金的慷慨支持，它为我的这次研究提供了时间和资源。以往优秀的范例以及现在古根海姆（Guggenheim）基金工作的成员们是我的工作持续不断的灵感之源。

科学的几位著名历史学家在这个项目上向我提出了有价值的建议。我谢谢他们真诚的帮助。他们包括 Gerald Holton、John Stachel、Martin J. Klein 和 Daniela Wünsch。也谢谢 Jürgen Renn 和 Anne J. Kox 的友好支持。费城地区的数学史研究会给予了巨大的指导。我谢谢这个组成员的意见，谢谢 David Zitarelli、Robert Jantzen、Paul Pasles、Jim Beichler 和 Thomas Bartlow 的重要帮助。我也要以此纪念我的导师 Max Dresden，他将科学史融入了丰富多彩的课堂中。

有幸会见并采访传奇的物理学家 John Wheeler 让我激动不已。我要谢谢他深刻的洞察力和盛情，并感谢 Kenneth Ford 安排此次会面还有他自己的一些意见。我也很幸运地与许多其他的重要物理学家进行了有价值的交谈，我要真挚地感

谢他们抽出宝贵的时间，他们是 Bryce DeWitt、Gary Gibbons、Paul Steinhardt、Raman Sundrum、Savas Dimopoulos、Alan Chodos、Lisa Randall、Claud Lovelace 和 Paul Wesson。多谢 Peter van Nieuwenhuizen 有用的文献。Jeff Harvey 友好地允许我引用他的打油诗。对于爱因斯坦的言语的引用，我要感谢加州理工学院爱因斯坦文集项目和以色列耶路撒冷希伯来大学爱因斯坦档案馆的允许。

非常感谢 Stanley Deser，他与我共享他的见解并抽出时间为了打开了一扇通向 Oskar Klein 世界的窗子。我要对巴黎 École Normale Supérieure 的 Bernard Julia 和 Eugene Gremmer 特别说一声谢谢。我还要感谢天文学家 Harry Shipman 和 Steven Dick，以及物理学家 Dieter Forster 和 Justin Vasquez-Poritz 的建议和支持。格廷根大学的数学家 Samuel J. Patterson 和 Martin Kneser 格外友好地详述了他们系的历史，特别是卡鲁扎在职的那段时间。精神病专家 John Smythies 的建议和有关维度与思想的文献给了我巨大的帮助。电影制片人 Peter Rose 说明了他的多媒体片断的背景和它们与高维的联系，在这里非常感谢。

Bergmann 家庭对我的研究给予了极大的帮助。有幸于 2002 年夏天与 Peter Bergmann 的会谈让我感到分外喜悦。他的逝世，让物理界失去了一位杰出的学者、组织者和教育家。我格外感激 Ernest Bergmann 友善地回答了有关他父亲的问题。我也要谢谢 John Bergmann、Joshua Goldberg 和 Linda Jean Owens（Peter Bergmann 逝世时的照料者）的帮助。Engelbert Schucking 是 Peter Bergmann 最亲密的朋友，还是



一位伟大的相对论学者，他好心地与我分享了有益的见解。

我想感谢 Robert S. Cox、Valerie -Anne Lutz 和美国哲学科学手稿图书馆的工作人员友好的帮助。而普林斯顿大学珍稀图书与特殊收藏品系员工的帮助，包括 Margaret Rich 和 AnnaLee Pauls，给予了我巨大的帮助，他们让我有机会查看爱因斯坦的复制文档。宾夕法尼亚大学的图书馆，Temple 大学，格廷根大学，剑桥大学和 London Metropolitan Archives 也给了我的研究很大帮助。也谢谢伦敦城市大学的图书管理员 David Rose 慷慨的支援，他给我看了 Edwin Abbott 文集并带着我参观了学校。David Martin，学校数学部的主任，也对我有所帮助。

我感谢 Felicity Pors、Finn Aaserud 和 Neils Bohr 档案馆的帮助，他们允许我查看 Oskar Klein 的文章，并且在我访问期间非常好客。我也感激 Harry Leechburch 的帮助，当我在莱顿博物馆 Boerhaave 浏览 Paul Ehrenfest 的材料，他提供了好心的帮助。

非常谢谢宾夕法尼亚科学大学的领导，包括 Philip Gerbino、Barbara Byrne、C. Reynold Verret、Charles Gibley、Margaret Kasschau、Elizabeth Bressi-Stoppe、Allen Misher、Anthony McCague、John Martino、Joseph Trainor、Robert Boughner 和 Stanley Zietz，他们让我度过了一个硕果累累的休假年，而无需为委员会的工作与教学分心。也谢谢教员 Roy Robson、David Traxel、Barbara Bendl、David Kerrick、Salar Alsardary、Durai Sabapathi、Tarlok Aurora、Ping Cunliffe、Amy Kimchuk、Lia Vas、Greg Manco、Bernard Brunner、

Charles Samuels、Roy Schriftman、Anatoly Kurkovsky、Robert Field、Ara der Marderosian 等人。我极为感谢 Judeth Kuchinsky，我所在系优秀的行政助理，还有 Shannon Stoner，图书馆出色的馆际互借管理员。

感谢 Arlene Renee Finston 在相片方面的帮助，还有 RichArt Graphics 的 Jerry Antner 描绘的精美的插图。

最后，我希望向我的家庭和朋友表示真挚的谢意，感谢他们那段时间付出的艰苦努力。我的父母，Stanley 和 Bernice；我的亲戚，Joe 和 Arlene；Herb 和 Peggy，还有 Richard、Anita、Alan、Beth、Kenneth 等家庭成员。他们都给予了我强有力的支持。Elana 和 Roy Lubit、Scott Veggebert、Marcie Glicksman、Dorothee 和 Helmut Funke、Simone Zelitch、Doug Buchholz、Lindsey Poole、Greg Smith、Donald Busky、Fred Schuepfer、Dubravko Klabucar、Mitch 和 Wendy Kaltz、Fran Sugarman 和 Michael Erlich，他们都给了我友好的帮助。尤其要谢谢我的妻子 Felicia 和我的儿子 Eli 和 Aden，感谢他们这些年来的爱。

索引

A

Abbott, Edwin Abbott 艾博特, 50,
53~57, 82, 93, 101, 275, 295
ADM formalism, ADM 公式, 220
Age of Exploration 航行探险时期, 17
Albrecht, Andreas 阿尔布雷特, 283,
283
Alfvén, Hannes 阿尔文, 228
Allegory of the Cave (Plato) 洞穴寓
言 (柏拉图), 12~13, 187
Alvarez-Gaumé, Luis 阿瓦瑞智·高
密, 249
Ampère, André-Marie 安培, 62
Anderson, Jim 安德森, 219
antigravity 反重力, 249, 272
anti-matter annihilation 反物质湮
灭, 228
antineutrinos 反中微子, 248
antiparticles 反粒子, 223
antiquarks 反夸克, 224, 232
Antoniadas, Ignatius 安东尼娅达斯,

269, 270

Appelquist, Thomas 阿贝奎斯, 246, 291
Aristotle 亚里士多德, 13
Arkani-Hamed, Nima 阿卡尼·哈默
得, 268~271, 272, 274, 276, 286
Arnowitt, Richard 阿诺维特, 214, 220
Arrhenius, Svante 阿伦尼乌斯, 115,
116, 118, 120
art 美术
four-dimensional 四维, 81~82, 83
higher dimensions, 高维, 293~294
three-dimensional, 三维, 15~16
two-dimensional, 二维, 15
Ashtekar, Abhay 阿斯特卡, 258, 259
astral plane, fourth dimension 星界,
四维, 46
astronomy, Galileo Galilei 天文学, 伽
利略, 17
atomic bomb. *see also* nuclear physics
原子弹, 见 原子核物理

B

Bergmann and, 伯格曼, 190

- Germany and, 德国和~, 196
Nazi Germany and, 纳粹德国和~, 178
- background radiation 背景辐射, 284
- Bacon, Francis 培根, 法国, 54
- Balla, Giacomo 巴拉, 81
- Banchoff, Thomas 班考夫, 47, 293~294, 295
- Bargmann, Sonja 巴格曼, 桑嘉 191
- Bargmann, Valentine 巴格曼, 瓦伦丁 163, 166~171, 174, 180, 191, 193, 196, 217, 238, 247, 291
- Bartels, Johann 巴特尔斯, 29
- baryonic matter 重子物质, 272
- baryons 重子, 223, 224
- baseball gun 棒球发射器, 52
- Becquerel, Henri 贝克勒尔, 2, 176
- Beichler, James 贝契勒, 57
- Bergmann, Emmy 伯格曼, 164, 165
- Bergmann, Ernest 恩斯特·伯格曼, 189, 212
- Bergmann, Esther 伊斯特·伯格曼, 164
- Bergmann, Margot (née Eisenhardt) 玛戈特·伯格曼, 164, 189, 190, 257
- Bergmann, Martha 玛撒·伯格曼, 164
- Bergmann, Max 马克斯·伯格曼, 163, 164, 167, 184
- Bergmann, Peter 彼得·伯格曼, 163~167, 169, 170, 171, 174, 178, 180, 188~191, 193, 198~199, 206, 210~212, 213, 214, 217, 219, 220, 221, 240, 257~258, 259, 274, 291
- Bergshoeff, Eric 伯格肖夫, 261
- Berryman, Clifford 贝里曼, 8
- Besso, Michele 贝索, 69, 87, 144
- beta decay β 衰变, 2
- Bethe, Hans 贝特, 210
- Beyer, Anna (Anna Kaluza) 拜耶, 104, 112
- Big Bang theory 大爆炸理论, 228, 246, 272, 283, 284~285
- Big Crunch 大崩塌, 284
- black hole 黑洞, 277, 282, 284
- Blavatsky, Helena P. 布拉瓦斯基, 45~46
- Bohr, Niels 玻尔, 95, 113, 115, 119, 120~121, 122, 124, 127, 130, 131, 132, 133, 135, 136, 137, 142, 144, 145~146, 148, 151, 156, 157, 162, 169, 171, 175, 177, 180, 183, 196, 207, 209, 278
- Bolyai, János 波尔约·鲍耶, 30~31, 35, 36, 37
- Bolyai, Wolfgang 沃尔夫冈·鲍耶, 14, 30
- Boole, George 布尔, 50
- Born, Max 玻恩, 116, 132, 136, 145, 146, 184, 217
- bosons 玻色子, 222, 232, 234, 235, 236, 265
- Bragdon, Claude 布雷格登, 26, 45, 46
- brane models 膜模型
See also string theory; superstring theory 见弦理论; 超弦理论, 9, 11, 12, 195, 202, 217, 290
- collision scenario 碰撞图景, 284



- cosmology 宇宙学, 285
dark matter 暗物质, 272~273
gravity 引力, 269~271
higher dimensions 高维, 282
Kaluza-Klein theory 卡鲁扎-克莱因理论, 276
Maldacena 马德西纳, 277~278
parallel universe 平行宇宙, 271~272
Randall-Sundrum, 兰德尔-桑卓姆模型, 280~281
string theory 弦理论, 264~266
Brans-Dicke scalar (dilation) 布兰斯-迪克标量 (膨胀), 109
Braque, Georges 布拉克, 81
Broad, C. D., 布罗德, 202
Brogie, Louis de 德布罗意, 123~124, 126, 129, 131, 144, 146, 252
Bruno, Giordano 布鲁诺, 17
bulk 体 (高维时空), 11, 12
Bunsen, Robert Wilhelm 本生, 116
Burger, Dionys 伯格, 57
- C
- Calabi, Eugenio 卡拉比, 256
Calabi-Yau spaces 卡拉比-丘空间, 256, 264, 293
Candelas, Philip 坎德拉斯, 255
Carr, Bernard 伯纳德, 202
Casimir effect 卡西米尔效应, 246, 280
Cayley, Arthur 凯莱, 39, 40~41, 42, 49, 55, 65, 292
CERN accelerator (Switzerland) 欧洲粒子物理加速器 (瑞士), 227, 232, 233, 239, 241, 286
Chadwick, James 查德威克, 176
Chaplin, Charlie 卓别林, 139~144, 147, 148, 150, 155, 200
Chaucer, Geoffrey 乔叟, 103
chirality (handedness) 手性 (旋向性), 21~24, 248~250
Cho, Yong Min 赵镛民, 245
Chodos, Alan 科多斯, 245~246, 291
Christianity, Middle Ages 基督教, 中世纪, 15
Clifford, William • Kingdom 克里福特, 38~40, 42, 43, 47, 55, 65, 91, 111, 219
Cohen, Andrew 科汉, 274
Colby, Walter 考尔比, 123
cold dark matter 冷暗物质, 272
Coleman, Sidney 科尔曼, 238
collective unconscious 集体无意识, 192, 202
Como Lecture 科莫讲座, 145~146
compactification 紧致化, 282
complementarity principle 互补原理, 120, 133, 135, 145
Compton effect 康普顿效应, 137
computer graphics, hyperspace representations 计算机图形, 超空间表示, 47
connections, general relativity 联络, 广义相对论, 88
Copernican universe 哥白尼式的宇宙, 17
cosmic background radiation 宇宙背景辐射, 284
cosmological constant 宇宙学常数, 249, 280

cosmology. *See also* universe 宇宙学, 见宇宙, 217, 228, 246, 272, 275, 279, 280, 283~289
Coulomb, Charles-Augustin 库仑, 62
Courant, Richard 柯朗, 28, 184, 185
Cremer, Eugene 奎姆, 230, 242, 243, 244, 248, 249
Crookes, William 克鲁克斯, 46, 210
cube 立方体, 13
Cubism 立体派, 81, 83
curvature concept, Riemannian geometry 曲率概念, 黎曼几何, 37~37
curvature tensor 曲率张量, 88, 109
Cyclic Universe 循环宇宙, 284, 285
cylinder condition 柱面条件, 109~110, 113

D

D'Alembert, Jean 达朗贝尔, 18, 19, 24, 57, 71
Dali, Salvador 达利, 51, 52
dark energy 暗能量, 272
dark matter, brane models 暗物质, 膜模型, 272~273
Darwin, Charles 达尔文, 117, 292
d'Auria, Riccardo 达乌亚, 250
Davies, Marion 戴维斯, 155
da Vinci, Leonardo 达·芬奇, 16, 81, 83
Debye, Peter 迪拜, 119
Deconstructing dimensions project 解构维数方案, 274~276
Derrida, Jacques 德里达, 274
Deser, Elsbeth (née Klein) 爱斯贝斯·狄塞, 183, 214

Deser, Stanley 斯坦利·狄塞, 6, 181~182, 191~192, 213~214, 218, 219~220, 221, 227, 228, 239, 241, 243, 249
de Sitter, Willem 德西特, 152, 204, 280, 281, 282, 283
Detweiler, Steven 戴威勒, 245~246
Deutsch, A. J. 铎特, 204, 295
Dewdney, A. K. 杜特尼, 57
de Wit, Bernard 德威, 249
DeWitt, Bryce Seligman 斯里格曼·拜思·德威特, 212~213, 214, 219, 220, 221, 240, 245
DeWitt-Morette, Cécile 塞西尔·德威特·莫尔, 214, 219, 220, 221
Dickens, Charles 狄更斯, 103
Diderot, Denis 狄德罗, 18
dilaton (Brans-Dicke scalar) Brans-Dicke 张量, 109
dimensionality. *See also* higher dimensions; specific dimensions 维度, 见高维; 特殊维度
of objects and space 对象与空间的~, 261
researches in ~的研究, 38~40
supersymmetry 超对称, 233
Dimopoulos, Savas 迪墨波罗, 269, 270~271, 272, 286, 287
Dirac, Paul 狄拉克, 115, 116, 135, 136, 137, 180, 197, 198, 219, 220, 223, 233, 238, 240, 257, 261, 269
Dirac equation 狄拉克方程, 137, 208, 238
distant parallelism 绝对平行原则,



149, 150, 193
 dodecahedron 十二面体, 13
 duality relationships 对偶性关系, 261~262, 263
 Duchamp, Marcel 杜尚, 81~82, 83
 Duff, Michael J. 达夫, 230, 249, 261, 262, 296
 Dukas, Helen 杜卡斯, 150, 156, 169
 Dunne, J. W. 邓恩, 141
 Dvali, Georgi (Gia) 德瓦利, 269, 270~271, 272, 278, 286
 Dyson, Freeman 戴森, 193, 210

E

Eastman, George 伊斯曼, 160
 Eddington, Arthur 爱丁顿, 111, 112, 135, 148, 149, 152, 180, 193
 Ehrenfest, Paul 得罗·埃伦费斯特, 86, 92~96, 100, 102, 105, 113, 120, 121~122, 129~130, 131, 134~135, 144, 145, 146, 156~157, 193, 271
 Ehrenfest, Tatyana 塔姬雅娜·埃伦费斯特, 93~94, 105, 156
 Ehrenfest, Vassik 瓦希特·埃伦费斯特, 157
 Einstein, Albert 阿尔伯特·爱因斯坦, 1, 2, 5, 6, 7~9, 18, 25, 33, 35, 57, 60, 61, 68~71, 72, 79, 80~81, 82, 83, 84~92, 94, 96~100, 107, 108, 109, 110~111, 112~113, 119, 121, 122, 125, 126, 129, 131, 132, 135, 138, 139, 140~163, 165~175, 180, 184, 185, 188~189, 191, 192, 193~195, 198, 204, 206, 207, 210, 211~212, 213, 215~217, 226, 233, 238, 246, 249, 256, 258, 260, 267, 274, 280, 282, 288, 291, 296
 Einstein, Elsa (née Löwenthal) 爱尔莎·爱因斯坦, 86~87, 96, 140, 141, 149, 153, 156, 169
 Ekpyrotic Universe 火宇宙, 284, 285
 electromagnetism 电磁学
 Einstein 爱因斯坦, 172, 174~175
 interactions of ~的相互作用 61~62
 Kaluza 卡鲁扎, 108~109
 Kaluza-Klein theory 卡鲁扎-克莱因理论, 5
 Klein 克莱因, 125~126
 natural forces 自然力, 2, 3, 4
 nuclear physics 原子核物理, 176
 research in ~研究, 63~66, 72
 Weyl, Hermann 外尔和~, 96~99
 electroweak theory 弱电理论, 4, 234, 240, 247, 254
 eleven-dimensional supergravity 十一维超引力, 218, 242~244, 245, 248, 251, 261
 embedding concept, Riemannian geometry 嵌入的概念, 黎曼几何, 36~37
 Englert, François 翁格勒, 249
 Eöt-Wash group Eöt-Wash 引力研究小组, 287
 EPR paradox EPR 佯谬, 162
 equivalence principle 等效原理, 84~85
 Euclid 欧几里得, 13~14, 16, 24, 25, 31, 36

Euler, Leonard 欧拉, 103
Euler's theorem 欧拉定理, 47
evolution theory 进化论, 58
extrasensory perception (ESP) 超感官知觉, 201

F

Fairbanks, Douglas 费尔班克斯, 139
Faraday, Michael 法拉第, 62, 63~64
fascism 法西斯主义, 135, 155
Ferdinand, Carl Wilhelm 斐迪南德, 29~30
Fermi, Enrico 费米, 176
fermions 费米子, 222, 232, 234, 236, 248
Ferrara, Sergio 费拉拉, 239
Feynman, Richard 费曼, 206, 207~210, 219, 220, 239, 250, 252, 253, 256~257, 260
fifth dimension. *See also* higher dimensions; Kaluza-Klein theory 第五维。见高维; 卡鲁扎-克莱因理论
Bergmann 伯格曼, 189
Einstein 爱因斯坦, 148, 151, 171, 173~174, 195
Jordan 约旦, 199
Kaluza 卡鲁扎, 107, 113, 187
Kaluza-Klein theory 卡鲁扎-克莱因理论, 6~7, 8
Klein 克莱因, 124~127, 128~129, 130~131, 136, 137, 174, 178, 180~183, 229
Nordström 诺德斯特朗, 91~92
Pauli 泡利, 193, 195

projective relativity 投影相对论, 159
Thiry 西里, 199
Fischer, Emil 费歇尔, 163
Fitzgerald, George 费兹杰罗, 68, 71, 78
Flexner, Abraham 亚伯拉罕·福莱克斯纳, 152, 153, 155, 159, 161, 167
Flexner, Simon 西蒙·福莱克斯纳, 167
Fock, Vladimir 福克, 129
Fokker, Adriaan 弗克尔, 87
Fomalont, Ed 弗马龙, 288
Fontenelle, Bernard 方特纳耳, 17
Ford, Ken 肯, 191
fourth dimension 第四维, 26
art 美术, 81~82
Bohr 玻尔, 121
concepts of ~的概念, 19~21
Einstein 爱因斯坦, 80~81
essays on 有关文章, 82~83
handedness (chirality) 手性 (旋向性), 21~24
identification of ~的定义, 18~19
Minkowski 闵可夫斯基, 73~74
Newtonian physics 牛顿物理, 18
religion 宗教, 44
space-time 时空, 73~78
time 时间, 18~19, 57~60, 71, 73
Fraenkel, Adolf 弗兰克尔, 113
Franck, James 弗兰克, 184
Frank, Philipp 弗兰克, 165, 167, 188
Fré, Pietro 福勒, 250
Frederick the Great (king of Prussia) 腓特烈大帝 (普鲁士国王), 103



Freud, Sigmund 西格蒙德·弗洛伊德, 192

Freund, Peter 彼得·弗洛伊德, 91, 244~245, 246

Futurism 未来派, 81~82

G

Galileo Galilei 伽利略, 17, 88, 228

Galison, Peter 盖里森, 72

Gamow, George 伽莫夫, 15, 137, 180, 294

Gates, S. James, Jr. 盖茨, 250

gauge 规范, 97

gauge theory 规范理论, 182, 201, 221, 225, 232, 234, 245, 254, 276, 292

Gauss, Carl Friedrich 高斯, 14, 24~25, 28~30, 31, 32, 33, 34~35, 38, 39, 42, 43, 72, 82, 104, 203

Gell-Mann, Murray 盖尔曼, 222, 223, 224, 228, 251

general theory of relativity 广义相对论, 40, 42

Einstein 爱因斯坦, 84~90, 17

gravity 引力, 2

Kaluza 卡鲁扎, 107~108, 109

Kaluza-Klein theory 卡鲁扎-克莱因理论, 5, 8

Kasner solution, Kasner 解, 246

quantum theory and 量子理论与~, 211~212, 258

research in 对~研究, 212~214, 219~220

Riemann 黎曼, 25, 35

scalar-tensor theory (Jordan-Brans-

Dicke model) 标量张量理论 (Jordan-Brans-Dicke 模型), 198~199

geometry 几何

Euclidean 欧式几何, 3~14, 29, 36

non-Euclidean 非欧几何, 24~25, 29, 30~32, 35~37, 40, 86

quantum theory 量子理论, 258~259

unified theory 统一理论, 282

geon theory 几何子理论, 219

Georgi, Howard 乔吉, 227, 231, 269, 274, 276, 279

Gibbons, Gary 吉本斯, 249, 282~283

Giddings, Steven 吉丁兹, 278

Giotto di Bondone 邦多纳, 15, 81

Glashow, Sheldon 格拉肖, 4, 224, 226, 227, 230, 231~232, 248, 263, 268

gluons 胶子, 265

Goethe, Johann Wolfgang von 歌德, 27

Goldberg, Joshua 戈德堡, 211, 214

Gordon, Walter 戈登, 115, 136, 183, 184

Göttingen, Germany 格廷根, 德国, 27~28

Goudsmit, Samuel 古兹米特, 130, 219

Grand Unified Theory (GUT) 大统一理论, 227, 269

Grassmann, Hermann 格拉斯曼, 39

gravitons 引力子, 265, 270, 289

gravity 引力

brane models 膜模型, 269~271

dimensionality of space and 与空间

维度, 20
 Einstein 爱因斯坦, 84~90, 172, 174~175, 216, 235
 higher dimensions 高维, 282
 interactions of 与~的相互作用, 62
 Kaluza-Klein theory 卡鲁扎-克莱因理论, 4~9
 M-theory M 理论, 12
 natural forces 自然力, 2, 3, 4
 Newton 牛顿, 17~18
 non-Euclidean geometry 非欧几何, 38
 quantum electrodynamics 量子电动力学 (QED), 210~212
 quantum theory 量子理论, 240, 258~259
 researches in 对~研究, 214, 217~220, 235~239
 scalar-tensor theory (Jordan-Brans-Dicke model) 标量张量理论 (Jordan-Brans-Dicke 模型), 198~199
 special theory of relativity 狭义相对论, 85
 supersymmetry 超对称, 235
 testing of 对其检验, 287~289
 Weyl 外尔, 96~99
 Great Depression 大萧条, 139
 Greece (ancient) 希腊 (古), 12~14
 Green, Michael 迈克尔·格林, 243~244, 250~251, 253~254
 Greene, Brian 布莱恩·格林, 296
 Grimm, Jakob 雅各·格林, 27~28
 Grimm, Wilhelm 威廉·格林, 27~28
 Grommer, Jakob 格罗梅, 111, 113, 150
 Gross, David 格罗斯, 255
 Grossmann, Marcel 格罗斯曼, 69,

85, 86
 ground state 基态, 95
 Grunwald, Clara 格伦沃, 164, 167
 Gubser, Steven 库伯斯, 278
 Guth, Alan 古斯, 283

H

hadronic string theory 强子弦理论, 232~234
 hadrons 强子, 222~223
 Hahn, Otto 哈恩, 175, 183
 hallucinogens 致幻剂, 202
 Hamilton, William 哈密尔顿, 39, 63
 Hamilton-Jacobi equation 哈密顿-雅可比方程, 125
 Handedness (chirality) 手性 (旋向性), 21~24, 248~250
 Harvey, Jeffrey 哈维, 255, 276, 277~278
 Hasse, Helmut 哈瑟, 185, 186, 188
 Hawking, Stephen 霍金, 285
 Hearst, William Randolph 赫斯特, 139, 155
 Heinlein, Robert 海因莱因, 204~205, 295
 Heisenberg, Werner 海森伯, 115, 116, 128, 130, 132, 133, 136, 137, 142, 146~147, 176, 177, 180, 184, 196, 204, 208, 211, 288
 Helmholtz, Hermann Ludwig Ferdinand von 亥姆霍兹, 72, 82, 116, 118
 Henderson, Linda Dalrymple 亨德森, 82, 83
 Hendrix, Jimi 亨德理克斯, 252



- Henry, Joseph 亨利, 62
- Hertz, Heinrich 赫兹, 66, 72
- Herzfeld, Karl 赫兹费德, 113, 169
- Heterotic string theory 杂化弦理论, 255
- Hierarchy problem 等级问题, 4, 269
- Higgs, Peter 希格斯, 225~226
- Higgs mechanism 希格斯机制, 240, 243
- higher dimensions. *See also* fifth dimension; Kaluza-Klein theory 高维, 见第五维; 卡鲁扎-克莱因理论
- Bohr 玻尔, 121
- brane models 膜模型, 282
- cosmology 宇宙学, 286~2889
- Deconstructing Dimensions project 解构维数方案, 274~276
- Ehrenfest 埃伦费斯特, 93~95
- Einstein 爱因斯坦, 141~142, 150~152, 171
- eleven-dimensional supergravity 十一维超引力, 218, 242~244, 245~248
- gravity 引力, 282
- hadronic string theory 强子弦理论, 232~234
- Julia 朱莉娅, 238
- Kaluza-Klein theory 卡鲁扎-克莱因理论, 4~9
- mysticism 神秘主义, 44~46
- researches in 对~的研究, 38~40, 41, 43, 220, 221
- Smythies 史密斯, 202
- supersymmetry 超对称, 231~235
- teaching of ~的传授, 292~296
- technology 技术, 296~297
- testing of ~的检验, 286~293
- Hilbert, David, 希尔伯特, 72, 84, 93, 96, 104, 105, 136, 184, 185
- Hinton, Charles Howard 查尔斯·霍华德·欣顿, 49, 50~53, 55, 57, 82, 93, 295
- Hinton, James 詹姆斯·欣顿, 50
- Hinton, Mary 玛丽·欣顿, 50, 51
- Hitler, Adolf. *See also* Nazi Germany; World War II 希特勒. 见纳粹德国; 第二次世界大战, 155, 157, 165, 178, 180, 183, 188, 196
- Hoffmann, Banesh 霍夫曼, 158, 159, 160, 162, 193
- holographic principle 全息原理, 277~278
- Holton, Gerald 霍尔顿, 83, 179, 188
- Horava, Petr 霍拉瓦, 264, 270
- Horowitz, Gary 霍洛维兹, 255
- hot matter 热物质, 284
- Howe, Paul 豪, 161
- Hubble, Edwin 哈勃, 138
- Hughes, James 休斯, 261
- Hugo, Victor 雨果, 241
- Humboldt, Alexander von 洪堡, 30
- Huxley, Aldous 阿道司·赫胥黎, 202
- Huxley, Thomas 托马斯·赫胥黎, 58
- hydrodynamics, electromagnetism 水
流体动力学, 电磁场, 64
- hypercube 超立方体, 47
- hyperspace. *See also* dimensions 超空间, 见 维度
- concept's origin 概念来源, 34
- hierarchy problem 等级问题, 4~9
- literature 文学, 49~50, 54~57, 58~59

perceptions 的感知, 50~53
 representations of 的表示, 47~49, 187
 rescarches in 研究~, 38~43
 Riemannian geometry 黎曼几何, 35~37
 supernatural and 超自然和~, 44~46
 teaching of 传授~, 292~296

I

Iacocca, Lee 艾科卡, 190
 icosahedron 二十面体, 13
 Inami, Takeo 稻见武夫, 261
 Indonesian puppet therter (Wayang Kulit) 印度尼西亚木偶戏(哇扬戏), 10~11
 Infeld, Leopold 英费尔德, 18, 151, 162, 214, 217
 inflationary universe model 暴胀宇宙模型, 283~285
 Institute for Advanced Studies (Princeton) 高等研究院(普林斯顿), 152~153, 155~156, 159, 166, 184, 188~189, 193~196, 235
 Interrational Centre for Theoretical Physics (ICTP) 国际理论物理中心, 228~229
 Internatioinal Union of Physics 国际物理联盟, 180
 isospin 同位旋, 177, 181
 Israeli-Palestinian confilict 以巴矛盾, 238

J

James, William 詹姆士, 49

Joos, Georg 尤奥斯, 186
 Jordan, Pascual 约当, 115, 135, 136, 191, 196~199, 200, 201, 206, 215, 217, 246, 269
 Jordan-Brans-Dicke model (scalar-tensor theory) Jordan-Brans-Dicke 模型(标量张量理论), 198~199, 206, 215
 Joseph, David W. 约瑟夫, 281~282
 Jouffret, E. 乔夫拉特, 83
 Julia, Bernard 朱莉娅, 230, 236, 238, 239, 240, 242, 244, 248, 249
 Jung, Carl 荣格, 192, 200, 202

K

Kaku, Michio 加来道雄, 296
 Kaloper, Nemanjia 卡尔卢普, 272
 Kaluza, Amalie 爱玛利亚·卡鲁扎, 102
 Kaluza, Anna 安娜·卡鲁扎, 104, 112
 Kaluza, Augustin 奥古斯丁·卡鲁扎, 103
 Kaluza, Dorothea 多萝西娅·卡鲁扎, 102, 107, 186
 Kaluza, Max 马克斯·卡鲁扎, 102, 103
 Kaluza, Theodor Franz Eduard 爱德华·弗朗茨·西奥多·卡鲁扎, 1, 5~9, 25, 33, 91, 99~100, 101~103, 115, 128, 129, 148, 183~188, 189, 195, 196, 198~199, 200~201, 215~216, 246, 291, 298
 Kaluza-Klein theory. *see also* fifth dimension; higher dimensions 卡鲁扎-克莱因理论, 见第五维; 高维, 40, 48, 51, 91, 230, 255~256, 276,



- 282, 288, 289, 290, 291.
Bergmann 伯格曼, 189, 198
cosmology 宇宙学, 246
described 的描述, 4~9
development of 的发展, 217~218, 220~221
Einstein 爱因斯坦, 150, 151, 159, 160, 171, 174, 195, 206, 216
Freund 弗洛伊德, 244~245
Hoffmann 霍夫曼, 160~161
Julia 朱莉娅, 238
legacy of 的传奇, 297~298
M-theory M 理论, 12
Pauli 泡利, 193, 195
Smythies 史密斯, 202
string theory 弦理论, 260
supergravity 超引力, 243
Witten 威滕, 247~250
Kant, Immanuel 康德, 20~21, 24, 43, 50, 72, 82, 95, 103
Kasner solution Kasner 解, 246
Kaufman, Bruria 考夫曼, 216, 217
Kent, Clark 肯特, 227
Khouri, Justin 考瑞, 284
Kirchhoff, Gustav Robert 基尔霍夫, 116
Klein, Felix 菲利克斯·克莱因, 48, 49, 66, 91, 93, 94, 104, 105, 187
Klein, Gerda Agnete, (née Koch) 珍姐·艾歌特·克莱因, 123, 179
Klein, Gottlieb 戈特利布·克莱因, 116, 118
Klein, Martin J. 马丁·J·克莱因, 94, 157
Klein, Oskar Benjamin 奥斯卡·本杰明·克莱因, 5~9, 48, 113, 114~138, 148, 150, 171, 174, 178, 179~183, 191, 193, 214, 217, 218, 219, 228~230, 238, 255, 278, 291, 298
Klein bottle 克莱因瓶, 23, 48
Klein-Gordon equation 克莱因-戈登方程, 136
Kneser, Martin 科内瑟尔, 106
Kopeikin, Sergei 科佩金, 288
Kramers, Hendrik 克拉默斯, 119, 120, 121, 128, 129, 180
Krauss, Lawrence 克劳斯, 280
- L**
- Laemmle, Carl 雷末耳, 140
Lagrange, Joseph-Louis 拉格朗日, 18~19, 57, 71, 241~242
Landsberg, Greg 兰德伯格, 289
Large Hadron Collider (LHC) 大型强子对撞机, 286, 289, 292, 297
Laub, Jakob 劳伯, 79
Laue, Max von 劳厄, 80, 155, 216, 217
Leadbeater, C. W. 李必特, 46
League of Nations 国际联盟, 180
Lee, T. D. 李政道, 228, 248
Lenard, Philipp 勒纳德, 196
L'Engle, Madeleine 兰歌, 205
leptons 轻子, 223
Levinson, Barry 莱文森, 236~237
Levy, Antonie 李维, 116
Lichnerowicz, André 李希纳罗维兹, 199, 218
light. See also optics 光, 见光学

Bohr 玻尔, 119
 Einstein 爱因斯坦, 144
 shadow and, three-dimensional art
 阴影和~, 三维艺术, 16
 special theory of relativity 狭义相对论, 69
 speed of ~的速度, 66~68
 Linde, Andrei 林德, 202, 283, 285
 Listing, Johann 李斯丁, 23, 33
 literature 文学作品
 fourth dimension 第四维, 82~83
 higher dimension 高维, 203~205
 hyperspace 超空间, 49~50, 54~57, 58~59
 parallel universe 平行宇宙, 294~295
 Liu, Jun 刘军 (音译), 261
 Lobachevsky, Nikolai 罗巴切夫斯基, 14, 31, 35, 36, 37
 Long, Joshua 朗, 288
 loop quantum gravity 圈量子引力理论, 258~260, 263
 Lorentz, Hendrik 洛伦兹, 68, 71, 72, 77, 78, 85, 92, 94, 118, 130, 146, 156
 Lovecraft, H. P. 拉夫克洛夫特, 203~204
 Lovelace, Claud 拉普拉斯, 233~234
 Lykken, Joseph 里肯, 288, 290
 Lyra, Gerhard 莱拉, 200~201, 215

M

magnetism. See electromagnetism 磁学, 见电磁学
 Maldacena, Juan 马德西纳, 276~278, 280, 291

Mandel, Heinrich 曼德尔 129, 137
 Manhattan Project, Bergmann 曼哈顿计划, 伯格曼, 190
 manifold concept, Riemannian geometry
 流形概念, 黎曼几何, 35
 Manyfold Universe 多流形宇宙, 272~273, 297
 Marić, Mileva 玛里奇, 69, 86, 87, 96
 Martinec, Emil 马特尼克, 255
 Massive Compact Halo Objects (MACHOs) 大质量致密晕族天体, 272, 273
 mathematics, three dimensional geometry
 数学, 三维几何, 13~14
 metrics 度规, 39, 41, 181
 Maxwell, James Clerk 麦克斯韦, 2, 5~6, 10, 62~67, 69, 71, 78, 87, 93, 97, 98, 108, 109, 125, 276
 Mayer, F. W. F. 迈尔, 104
 Mayer, Walther 沃尔特·迈尔, 9, 149~150, 151, 153, 154, 156, 159, 161
 McGovern, George 麦戈文, 238
 media 媒介
 Einstein 爱因斯坦, 149
 higher dimensions 高维, 202~205, 294~296
 Meitner, Lise 迈特纳, 183
 mescaline 墨斯卡灵 (一种致幻剂), 202
 mesons 介子, 77, 181, 183, 223, 224
 metric concept, Riemannian geometry
 度规概念, 黎曼几何, 35~36
 metric tensor 度规张量, 77, 97,



- 108, 216
- Michelangelo 米开朗琪罗, 16, 83
- Michelson, Albert 迈克耳孙, 67, 68
- Middle Ages 中世纪, 15, 16~17
- Mie, Gustav 迈, 87
- Millikan, Robert 密立根, 138, 155
- Mills, Robert 米尔斯, 182, 221, 223, 234
- Milton, John 弥尔顿, 54
- Minkowski, Hermann 赫尔曼·闵可夫斯基, 57, 60, 71~80, 83, 84, 87, 88, 89, 90, 104, 105
- Misner, Charles 麦思纳, 214, 220
- Möbius, August 牟比乌斯, 23, 24, 25
- Möbius strip 牟比乌斯带, 23, 24, 33, 204
- Moller, Christian 慕勒, 183
- Montessori, Maria 蒙台梭利, 164
- Montonen, Claus 蒙台恩, 263
- Moore, Stanford 穆尔, 167
- Morley, Edward 莫雷, 67, 68
- motion 运动
- Einstein 爱因斯坦, 162~163
- Newton, Isaac 牛顿, 17~18, 67
- M-theory M 理论, 9, 40, 251, 263~266
- fiction 小说, 296
- Maldacena 马德西纳, 276
- Sundrum 桑卓姆, 280
- teaching of 的传授, 293
- testing of 的检验, 11~12, 274, 275, 286, 292
- muons μ 介子, 177, 248
- Mussolini, Benito 墨索里尼, 135
- Mussorgsky, Modest Petrovich 穆索尔斯基, 27
- mysticism, higher dimensions 神秘主义, 高维, 44~46
- N
- Nahm, Werner 纳姆, 243, 248
- Nambu, Yoichiro 南部阳一郎, 232
- Napoleon (emperor of France) 拿破仑 (法国国王), 30
- Nappi, Chiara 拿普, 238~239
- National Aeronautics and Space Administration (NASA) 美国国家航空和宇宙航行局, 272
- natural forces 自然力
- described 的描述, 2~4
- interactions of 的相互依存, 61~62
- Kaluza-Klein theory 卡鲁扎-克莱因理论, 4~9
- Nazi Germany. *See also* World War I 纳粹德国, 见 第二次世界大战, 28, 153~155, 157, 165, 166, 168, 178, 183, 184~188, 193, 196~197, 215, 216, 229
- Nee' man, Yuval 尼曼, 223, 224
- Nemorarius, Jordanus 尼莫拉瑞厄思, 228
- Neumann, John von 诺伊曼, 191
- neutralinos 中立子, 286
- neutrinos 中微子, 248, 272
- neutron 中子, 176
- Neveu, André 南夫, 234, 236
- Newcomb, Simon 西蒙·纽科姆, 49, 53, 59~60, 82

Newmann, Ted 纽曼, 214
 Newton, Isaac 牛顿, 2, 17~18, 20, 38, 39, 54, 62, 67, 68, 69, 142, 287
 Nicolai, Hermann 尼古莱, 249
 Nightingale, Florence 南丁格尔, 41
 Nilsson, Bengt E. W. 尼尔森, 250
 Nishina, Yoshio 仁科芳雄, 115, 137
 Noether, Emmy 诺特, 184
 nonperturbative methods 非微扰方法, 260~261
 Nordström, Gunnar 诺德斯特朗, 7, 86~87, 90~93, 105, 129
 nuclear physics, *See also* atomic bomb
 原子核物理, 见 原子弹, 175~178, 183

O

occult. *See* supernatural forces 神秘学, 见 超自然力。
 octahedron 八面体, 13
 Oersted, Hans Christian 奥斯特, 62
 Olive, David 奥利夫, 263
 Oppenheimer, Robert 奥本海默, 135, 208, 210, 213
 optics. *See also* light 光学, 见 光
 electromagnetism 电磁学, 64~65
 research in 的研究 66
 Osmond, Humphry 奥斯蒙德, 202
 Ostwald, Wilhelm 奥斯特瓦尔德, 118
 Ouspensky, P. D. (Peter) 邬斯宾斯基, 46
 overdetermination 超定, 173
 Ovrut, Burt 奥维儒特, 278, 279, 284

P

Pais, Abraham 派斯, 8
 parallel postulate 平行公设, 14, 31
 parallel universe 平行宇宙, 271~272
 paranormal experience, fourth dimension. *See also* supernatural forces 超常体验, 第四维, 46。见 超自然力
 parapsychology *See also* supernatural forces 心灵玄学, 200~202。见 超自然力
 particle theory *See also* specific theories and particles 粒子理论, 222~230 见 特定的理论与粒子
 Pascal, Blaise 帕斯卡, 228
 Pati, Jogesh 帕提, 227
 Pauli, Wolfgang 泡利, 6, 7, 115, 121~122, 125, 128, 130, 135, 137, 138, 149, 151~152, 165, 166, 174, 176, 191~196, 197, 198, 199, 200, 201, 208, 215, 217, 218, 238, 291
 Pauli principle 泡利原理, 130, 232
 perception 知觉
 hyperspace 超空间, 50~53
 Perrin, Jean-Baptiste 佩兰, 118
 perturbative methods 微扰方法, 260
 photons 光子, 222, 223, 265
 Picasso, Pablo 毕加索, 81
 Pickford, Marry 璧克馥 139
 Pickover, Clifford 匹克欧尔, 296
 pion π 介子, 177
 Planck, Max 普朗克, 204
 Planck scale 普朗克尺度, 243, 245, 246



Planck's constant 普朗克常量, 6, 126
 plasma physics 等离子物理, 228
 Plato 柏拉图, 12~13, 72, 187
 Platonic solids 柏拉图立体, 13~14
 Playfair's axiom 普雷菲尔公理, 14
 Podolsky, Boris 波多尔斯基, 162
 Poincaré, Henri 庞加莱, 72, 73, 83
 Poland 波兰, 180
 Polchinski, Joseph 泡耳钦斯基, 261, 264
 Polish Intellectual Cooperation Committee 波兰知识分子合作委员会, 180
 Pope, Christopher N. 波普, 250
 Pound, Robert 庞德, 267
 Price, John 普莱斯, 288
 Princeton Institute for Advanced Studies 普林斯顿高等研究院, 152~153, 155~156, 159, 164, 184, 188~189, 193~196, 235
 probability 几率, 172
 projective relativity 投影相对论, 159, 160, 193, 198, 238
 psychedelic experiments 幻觉试验, 202
 psychics, fourth dimension. *See also* supernatural forces 心理学, 第四维, 45~46. 见超自然力
 psychoanalysis 精神分析, 192, 200
 Ptolemy 托勒密, 13, 19
 Pythagoreans 毕达哥拉斯, 13
 Pythagorean theorem 毕达哥拉斯定理, 35~36, 77, 89

Q

quantum chromodynamics (QCD)

量子色动力学, 3, 224, 234, 291~292
 quantum electrodynamics (QED) 量子电动力学, 2, 208~210, 224
 quantum theory 量子理论
 Bohr 玻尔, 145~146
 Einstein 爱因斯坦, 142~143, 144~145, 146~147, 151, 162, 171, 174, 256
 Feynman 费曼, 207~208
 general theory of relativity and 广义相对论和~, 211~212, 258
 geometry 几何, 258~259
 gravity 引力, 239~240
 Heisenberg 海森伯, 132~133
 Jordan 约旦, 136
 Kaluza-Klein theory 卡鲁扎-克莱因理论, 6~7
 Klein 克莱因, 115, 120~121, 123, 128, 131, 133, 136
 Nazi Germany 纳粹德国, 185
 nuclear physics 原子核物理, 175~178
 Pauli 泡利, 193
 Schrödinger, 薛定谔, 132~133
 strong interaction, 强相互作用, 2~3
 Wheeler-DeWitt equation 惠勒-德威特方程, 220
 quarks 夸克, 222, 224, 232, 248
 quaternion theory 四元数理论, 39, 63

R

Rabi, I. L. 拉比, 177
 radioactive decay 放射性衰变, 2, 176
 radio waves 声波, 66

Randall, Dana 多娜·兰德尔, 279
 Randall, Lisa 丽萨·兰德尔, 268, 274, 279~281, 283, 285
 Raymond, Pierre 雷蒙德, 234
 Reichenbach, Hans 赖欣巴哈, 200
 relativity theory, See general theory of relativity; special theory of relativity
 相对论。见 广义相对论, 狭义相对论
 religion, hyperspace 宗教, 超空间, 44
 Renaissance art 文艺复兴时期的艺术, 15~16, 17
 Reynolds, Cecil 雷诺兹, 141~142, 144~150
 Rhine, Howard Banks 莱茵, 201
 Riemann, Georg Friedrich Bernard 黎曼, 25, 32~37, 38, 39, 40, 42, 43, 86, 91, 104, 203, 247, 292
 Riesenfeld, Ernst 雷森福得, 118
 Robbin, Tony 罗宾, 294, 295
 rock climbing 攀岩, 278~279
 Rohm, Ryan 欧姆, 255
 Rome (ancient) 古罗马, 15
 Roosevelt, Franklin D. 罗斯福, 178
 Rose, Peter 罗斯, 294~295
 Rosen, Nathan 罗森, 162, 217, 296
 Rosenfeld, Léon 罗森菲尔德, 180, 210, 257
 Rovelli, Carlo 罗威利, 258~259
 Rowling, J. K. 罗琳, 49
 Rubakov, Valery 鲁巴柯夫, 282
 Rubin, Mark A. 罗宾, 244, 245
 Rucker, Rudy 拉克, 54, 295
 Rust, Bernhard 拉斯特, 185

S

Salam, Abdus 萨拉姆, 4, 116, 183,

206, 220, 226, 227, 228 ~ 229, 230, 233, 238, 246, 247, 248, 249, 254
 scalar 标量, 90
 scalar-tensor theory (Jordan-Brans-Dicke Model) 标量张量理论 (Jordan-Brans-Dicke 模型), 198~199, 206
 Schild, Alfred 思契德, 214
 schizophrenia 精神分裂症, 202
 Schlegel, Victor 施莱格尔, 48, 187
 Schofield, A. T. 斯科菲尔德, 44
 Schrödinger, Erwin 薛定谔, 115, 116, 128, 131, 132, 133, 144 ~ 145, 146
 Schrödinger equation 薛定谔方程, 115, 125, 128, 145
 Schucking, Engelbert 夏金, 199, 210, 219, 258
 Schwarz, John 施瓦茨, 233 ~ 234, 235, 238, 239, 243, 244, 250 ~ 251, 253~254
 Schwinger, Julian 施温格, 182, 208 ~ 210, 212~213, 224, 239
 science fiction 科幻小说, 203 ~ 204, 294~295
 sculpture, three-dimensional art 雕塑, 三维艺术, 16
 selectrons 标量电子, 286
 Sen, Ashoke 森, 263
 Serling, Rod 塞林, 202
 Seurat, Georges 修拉, 240
 Sezgin, Ergin 修森, 261
 shadow, light and, three-dimensional art 阴影, 光线和~, 三维艺术, 16
 Shakespeare, William 莎士比亚, 54,



- 103
- Shaposhnikov, Misha 莎波斯尼可夫, 282
- shrinkage 收缩, 246
- Siegel, Warren 西格尔, 250
- singularities 奇点, 162, 172
- Six-Day War 六日战争, 229
- Slade, Henry 斯莱德, 44~45, 65, 142
- Smolin, Lee 斯莫林, 258, 259
- Smythies, John R. 史密斯, 201~202
- Society of Psychical Research 通灵研究协会, 46, 142, 201
- Solvay Institute conference 索尔未研究所会议, 145~146
- Sommerfeld, Arnold 索末菲, 80
- space 空间
- gravity 引力, 2
 - non-Euclidean geometry 非欧几何, 40, 43
 - special theory of relativity 狭义相对论, 70~71
- space-time 时空
- Einstein 爱因斯坦, 151, 216
 - Kaluza 卡鲁扎, 109, 110
 - Minkowski 闵可夫斯基, 73~78, 84, 87, 88
- space travel 时空旅行, 296~297
- special theory of relativity 狭义相对论
- gravity 引力, 85
 - light 光, 69
 - Minkowski 闵可夫斯基, 71~80
 - space 空间, 70~71
 - time 时间, 70
- Spinoza, Baruch 斯宾诺沙, 138
- Spiropulu, Maria 思白普路, 288
- spontaneous symmetry breaking 自发对称破缺, 225~228
- squarks 夸克, 286
- Stachel, John 斯塔赫尔, 8, 79, 94, 158
- Stanford Linear Accelerator (SLAC) 斯坦福线性加速器, 269
- Stark, Johannes 斯塔克, 196, 197
- Stein, William H. 斯坦, 167
- Steinhardt, Paul 斯坦哈特, 283, 284, 285
- Stelle, Kellogg 斯特勒, 261
- Stewart, Ian 斯图尔特, 57, 295~296
- Strauss, Charles 斯特劳斯, 293~294
- stress-energy tensor 应力能张量, 88, 111, 150, 198
- Stringham, W. Irving 斯特林厄姆, 47~48, 49, 82
- string theory 弦理论, 268
- See also brane models; superstring theory 见膜模型; 超弦理论, 202, 262~263
 - cosmology 宇宙学, 285~286
 - gravity 引力, 235
 - hadronic 重子, 232~234
 - loop theory compared ~与圈理论比较, 259
 - Maldacena 马德西纳, 276~278
 - M-theory M理论, 263
 - superstring theory 超弦理论, 9, 217, 234, 244, 250~257
- Strominger, Andrew 斯特罗明格, 255, 274
- strong forces 强力
- natural forces 自然力, 2~4

- subatomic physics 亚原子物理, 222~224
- supersymmetry 超对称, 232, 233
- subatomic physics. *See also* specific theories and particles 亚原子物理, 见特定的理论与粒子
- Kaluza-Klein theory 卡鲁扎-克莱因理论, 206
- strong forces 强力, 222~224
- supersymmetry 超对称, 231~233
- weak forces 弱力, 224~228
- Sundrum, Raman 桑卓姆, 279, 280~281, 283
- supergravity 超引力, 9, 239~224, 246, 249~250, 251
- supermembranes 超膜, 261
- supernatural forces 超自然力 9, 26~27, 44~46, 142, 151, 200~202
- superspace 超空间, 232
- superstring theory, *See also* brane models; string theory 超弦理论, 9, 217, 234, 244, 250~257, 262, 285 见膜模型; 弦理论
- supersymmetry 超对称, 231~235, 239, 240, 249, 261
- Susskind, Leonard 萨斯坎德, 227
- Sylvester, James J. 西尔维斯特, 40~43, 46~47, 49, 55, 57, 72, 82
- Sylvester, Sylvester J. 西尔维斯特·J·西尔维斯特, 41
- symmetry breaking, spontaneous 对称破缺, 自发, 225~228
- T
- tachyonic cuts 超光速捷径, 233
- Tait, Peter 泰勒, 65
- technology, higher dimensions 技术, 高维, 296~297
- telepathy. *See also* supernatural forces 心灵感应, 200~202, 见超自然力
- temperature 温度, 76
- ten-dimensional superstring theory 十维超弦理论, 256
- tensors 张量, 76~77, 87~88, 90, 198
- tesseract 超正方体, 50~51, 57
- tetrahedron 四面体, 13
- theory of invariants 不变量理论, 41~42
- Theosophy movement 通神运动, 45~46, 82, 292
- Thiry, Yves 西里, 199, 206
- Thomson, J. J. 汤姆逊, 72
- 't Hooft, Gerardus 特胡夫特, 227, 234, 277
- Thoreau, Henry David 梭罗, 63
- Thorne, Kip 索恩, 296
- three-dimensional art 三维艺术, 15~16
- three-dimensional geometry, Greece (ancient), *see also* Euclid; geometry 三维几何, 古希腊, 13~14, 见欧几里得; 几何
- time 时间
- fourth dimension 第四维, 18~19, 57~60, 71, 73
- gravity 引力, 2
- Newtonian physics 牛顿物理, 69
- special theory of relativity 狭义相对论, 69~70
- The Time Machine* (Wells) 《时间机



器》，58~59

Tolkien, J. R. R. 托尔金, 267

Tolman, Richard 托尔曼, 135, 138, 150, 155, 157, 189

Tomonaga, Itiro 朝永振一郎, 208, 210

Tonnelat, Marie Antoinette 托尼拉, 218

Townsend, Paul 唐森德, 261

transrealism 超现实, 295

Tschirnhaus transformations Tschirnhaus 变换, 104

Turok, Neil 图尔克, 284

The Twilight Zone (television series) 《暮色地带》(电视系列剧), 202

two-dimensional art 二维艺术, 15

U

Uhlenbeck, George 乌伦贝克, 130~131

uncertainty principle 不确定原理, 133, 143, 145, 208, 211, 288

unidentified flying objects (UFOs) 不明飞行物, 201

unified theory 统一理论

Einstein 爱因斯坦, 111, 147~148, 149, 159, 172, 216, 282

electromagnetism 电磁场, 66

Kaluza 卡鲁扎, 108

Nordström 诺德斯特朗, 91

Pauli 泡利, 192~193

quest for 对~的质疑, 60, 62

Riemann 黎曼, 33, 38

subatomic physics 亚原子物理, 222~224

teaching of 教授~, 292~296

technology 技术, 296~297

Weyl 外尔, 96~99, 128

Yang-Mills gauge theory 杨-米尔斯规范场论, 221

universe, *See also* cosmology 宇宙, 见宇宙学

astronomy 天文学, 17

Newtonian physics 牛顿物理, 17~18

V

van Dongen, Jeroen 冬根, 174

van Nieuwenhuizen, Peter 纽文惠仁, 227, 239, 250

Veblen, Oswald 维布伦, 159, 160, 161, 193, 268

Veneziano, Gabriele 维内齐亚诺, 232

Verne, Jules 凡尔纳, 49

virtual photons 虚光子, 208

W

Walpurgis Night 沃尔帕吉斯之夜, 26~27

warp factor 卷曲因子, 280

waves 波

Broglie, Louis de 德布罗意, 123~124, 126

electromagnetism 电磁场, 64~65

weak forces, 弱力,

natural forces 自然力, 2, 4

subatomic physics 亚原子物理, 224~228

Weber, Max 马克思·韦伯, 81

Weber, Wilhelm 威廉·韦伯, 33, 34, 62, 72

Weinberg, Steven 温伯格, 4, 189, 226, 227, 230, 231, 246, 247, 248, 251

Weisskopf, Victor 韦斯科夫, 188
 Wells, H. G. 韦尔斯, 18, 49~50, 58~59, 71, 82
 Wentzel, Gregor 温特泽尔, 166
 Wess, Julian 韦斯, 234, 239
 Wesson, Paul 文森, 282
 West, Peter 韦斯特, 249
 Weyl, Hermann 外尔, 96~99, 102, 105, 108, 110, 111, 112, 128, 148, 149, 166, 181, 184, 185, 193, 201, 217
 Wheeler, Janette 珍妮特·惠勒, 169
 Wheeler, John 约翰·惠勒, 89, 169, 177, 196, 207, 214, 219, 220, 259, 277, 296
 Wheeler-DeWitt equation 惠勒-德威特方程, 220, 257, 258
 Whitman, Walt 惠特曼, 63
 Wigner, Eugene 维格纳, 180
 Wilde, Oscar 王尔德, 46
 Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) 威尔金森微波各向异性探测器, 272, 283
 Wiltshire, David 威尔特, 282
 witchcraft. see also supernatural forces

魔法, 26~27, 44, 见 超自然力
 Witten, Edward 威藤, 236~239, 247~249, 251, 254, 255, 262~263, 264, 270
 wormholes 虫洞, 296~297
 Wünsch, Daniela 伍戚, 102, 185

Y

Yang, Chen Ning (Frank) 杨振宁, 182, 221, 223, 228, 234, 239, 248
 Yang-Mills gauge theory 杨-米尔斯规范场论, 221, 223~225, 227, 240
 Yau, Shing-Tung 丘成桐, 256
 Yukawa Hideki 汤川秀树, 116, 177, 180, 181, 223

Z

Zeeman effect 塞曼效应, 130, 131
 Ziegenbein, Paul 奇格拜, 185
 Zöllner, Johann 珠勒, 44~45, 46, 83, 142, 201, 292
 Zumino, Bruno 朱米诺, 234, 239, 241
 Zweig, Georg 茨威格, 222, 224

译后记 | 超越之路

天问与天对

请问：

遂古之初，谁传道之？

上下未形，何由考之？

冥昭瞢暗，谁能极之？

冯翼惟像，何以识之？

明明暗暗，惟时何为？

阴阳三合，何本何化？

圜则九重，孰营度之？

惟兹何功，孰初作之？

.....

屈原从探求宇宙的奥秘开始，提出一连串的问题。一千多年后，唐代的柳宗元写了《天对》，对《天问》中提出的问题一一

解答，柳宗元认为宇宙万物的生成是阴、阳、天三者相互结合，由元气加以统帅，并使之交互作用的结果。元气缓慢吹动造成炎热，迅疾吹动造成寒冷；寒暑交替促成万物的发生。宇宙“溔弥非垠”，“东西南北其极无方”。宇宙本身是无限的。

屈原和柳宗元一问一答，不论合理或者对错，至少从一个侧面反映了他们对世界终极面貌的探寻。自从人类诞生，时时刻刻脚踏大地，头顶苍穹；在广袤富饶的大地生生不息时，却对这个世界毫不知觉，这激发着我们不停地思考，从古至今。一代代人无不怀着这种执著繁衍生息，即使我们无法理解大自然的奥秘，也会付诸笔墨，虔诚地记下“七月流火”，“客星”等现象。

然而人类不会就此止步，特别是西方文化复兴以来，文学与科学发展的步伐猛然加速，在思想的天空相交辉映。得益于此，脱胎于古老哲学的物理学，一次次地掀起世界的面纱，将一个愈加美丽简洁的世界展现于世人眼前。从此，我们开始邂逅原子、电子这些不可思议的精灵，也试图同上帝一道，开始书写宇宙的编年史，恒星的奥得赛；因为我们矢志不移，语言没有让我们变得混乱，无法相互理解，通过建立抽象的物理语言，为人类搭建起一架通往九天之上的思想天梯。这里有相对论，通过牛顿等人的启蒙，爱因斯坦终于在广义相对论的框架下构建时空的宏伟蓝图；这里有量子论，从始至终，围绕它充满了猜测、质疑、辩论、验证，然而，到目前为止没有任何实验将其击倒。最让人难以置信的，是这两种伟大的描述世界的理论，会面时依然羞羞答答，让那些想当红娘的物理学家苦恼



不已。

原子和宇宙，代表微观世界和宏观世界。但是，将宇宙称为宏观似乎对不起它的分量，所以也有人提出“宇观”的说法，意指比我们宏观世界（比如地球）更广大的宇宙空间；相应的，“渺观”指的是原子层次以下的世界。这样，物理学的发展将人类对世界的认识推进到了如下层次：渺观，微观，介观，宏观，宇观，我们已经有不同的理论描述这些截然不同的世界，也正在努力发展统一的理论，在更加基础的层次囊括上述世界的运行规律。

物理学的发展放在人类历史上，短暂如瞬间。然而，就在这刹那，它却记录了人类对世界认知的数次嬗变，一次次地逼近存在的本质，同时更加不那么平易近人，颇具形而上的意味。于是，宗教与迷信开始搅乱这片领域。宗教一般与物理学家个人的信仰、惊世骇俗的理论有关；而对理论的误解和迷信在民间的传播，则造成了更大的危害。

宇宙之歌

在大哲学家康德的墓碑上，镌刻如下文字：

有二事焉，常在此心，敬而畏之；与日俱新：上则为星辰，内则为德法。每每抬头仰望星空，才知道人类自身的渺小和卑微。

人类对宇宙的认识完全是一部科学发展史的缩影。最初，

缺乏科学工具，人们便把自己生活的地方当作宇宙中心。“八荒六合，唯我独尊”，这恰恰是无知与高傲的体现。然后，我们发现自己并非太阳系的中心，只是完全在偶然的情况下诞生于这个世界，于是卑微感油然而生；然后我们又发现，太阳系其实只是银河系的边缘；接着，更大的星系，总星系的陆续发现，让人类原本微薄的自尊荡然无存。我们只是神奇的“造物主”在构建宇宙的宏伟大厦过程中，一不小心造出的附产品，就像女娲树枝沾上的泥水那样不足为道。但是，我们无法不去感恩，因为我们竟然能作为物质与思维合二为一的有机存在，并且用诞生于物质的思维思考物质和思维本身。

现在，就让我们以地球成员的身份，目睹一下宇宙成员恒星的诞生和死亡：^①

恒星热热闹闹的人生故事是从一团气体开始的。这团云是否会最后在引力的作用下聚集在一起与许多因素有关，包括它的密度、温度和质量……当一块云自行塌缩时，密度不断增大……许多不同的小区域在引力的作用下塌缩，形成一团团的小恒星……最终形成恒星的气体——大部分是氢和氦——朝着一个中心自由落体。原子在下落过程中拥挤在一起，相互碰撞并使温度上升。这个阶段，温度随着云的塌缩而上升以至于核心发生剧烈的碰撞而形成氦元素，氦核又撞击在一起形成更重的元素……大于 8

^① 摘自《伽利略的手指》，讲述了十个伟大的科学思想，湖南科学技术出版社。



个太阳质量的恒星……内部温度升高得很快，大约可到30亿度，因此会发生“硅燃烧”，在那里氦核可以与接近的硅核子融合并逐渐形成更重的元素，并根据元素周期表最后形成铁和镍元素。这两种元素有最稳定的核结构，并且不会再通过核燃烧来释放能量。这个阶段，恒星有一个洋葱皮结构，最后形成元素是洋葱的核，轻的元素则次第形成包围核心的壳层。每一个这样的阶段完全取决于恒星的质量……

核心的温度现在非常高，大概80亿度左右，在那里光子的辐射非常强烈，它们可以将铁核分裂成中子和质子，所以想要破坏核合成的成果需要几十亿年。这个阶段能量从核心转移出去，然后开始突然冷却。现在很难再维持核心的结构，于是核心开始塌缩。核的外层开始自由落体，它们的塌缩速度可以达到将近七万千米每秒……塌缩快到恒星外围区域的物质跟不上……恒星的外围区域就形成了一个空壳层，它包围着因塌缩而形成的很小的核。塌缩的内核开始收缩，然后又向外反弹膨胀，同时将中微子激波通过外核送出去。激波加热了核的外部，并因为粉碎阻碍它的重元素核而损失能量，形成的外核并不是很厚，开始的20毫秒之内，激波逃逸出了恒星的外围并在核外形成一个很大的弧，并且迫使它前面的恒星物质形成巨大的球形海啸。

……如果恒星的初始质量大于25个太阳质量，甚至会形成一个黑洞……因为原初的氢元素和氦元素已经在恒星中将经过再加工，散到了星系中。这些元素可能混合进

了新一代的恒星中，有些会凝聚成尘埃，尘埃聚集为石头，石头成巨岩，最后巨岩成行星。

于是，人类便这样从灿烂的星光中诞生。

任何反思过我们为何生存在这个世界的人都少不了类似康德的对宇宙的敬畏之情。作为永远的哲学命题，物理学以更加务实的姿态，孜孜不倦地探索物质的本源，无论是星空的天体，还是细微的原子。

原子世界

从上面的论述中，可以发现，宇宙其实是从非常简单的元素开始形成，而人类自古以来便有分割物质，洞窥初源的意愿。东西方皆有观点认为自然世界由基本元素组成，只是组成元素各有千秋，不过大都离不开物质世界常见的水火气之类。对微观的探寻一直没有停息，最开始是分子，然后到原子层次，直到20世纪，我们才真正的用STM（扫描探针显微镜）“看到”单个的原子。可以说，再往下探索困难重重，主要因为量子力学效应造成的测量困难，更加先进精密的测量仪器越来越难以制造。明显的证据是从物理理论到应用转化的时间越来越长，像量子理论，相对论从提出到成熟的应用花费了数十年的时间，更别说诸如超弦等现代前沿理论了，其验证所需要的能量远远超过人类所能产生的，更不用说在实际生活中应用。

说到原子，就不能不提到电子，原子的忠实兄弟，总是成



群结队地簇拥于原子核周围。电子的发现比较早，并且一直以基本粒子的身份坚持到现在，而曾经与之为伴的“伪”基本粒子陆续被人类的慧眼识穿。自旋是电子区别宏观物质的属性之一，你不能把电子的自旋想象为像杂技演员手中的皮球一样飞快旋转（那样的话旋转速度将超过光速），它完全是一个量子现象，那么从乌仑贝克和古兹米特发现了电子自旋至今几十年，我们对自旋有了最终的描述了吗？杨振宁教授回答道：“我不这样认为，”他问道，“……我们已经具备足够的知识回答‘自旋是一种结构呢，还是存在几类电子呢’这样的问题吗？”

量子与引力

某种意义上，爱因斯坦独自一人开创了相对论学说，把人们对物质和时空的认识推进到了崭新的层次，从此，物质不再是脱离时空的物质，时空不仅仅是容纳物质的时空，两者相互影响，形成有机整体；从此，时间不再孤单，物理学家开始畅想，诗人开始吟诵；沙中的三千世界度过无数轮回，蝴蝶梦映照镜中的真实。量子力学不同，它的诞生非一人之力，非一时之功；彷徨犹豫矛盾争辩妥协，仿佛浣衣女喋喋不休的争论却永远没有结果，却让人惊奇地被实验遍遍证实；前后经历几十年，至今依然有令人迷惑之处；当不确定性成为确定的存在，似乎世界和灼热的爱情一样难以为继。

量子说到底，是自然本质的体现，即分立性或者非连续性。人类对量子的探索并非一帆风顺。它的产生和发展充满了波澜和戏剧性，是人类集体智慧的体现。宇宙中的任何振动所

具有的能量都是最小能量元 $h\nu$ 的整数倍， h 是普朗克常数，是振动的频率，这么重要的东西之所以没有被人们察觉，重要原因是这个值太小，小到几乎可以忽略不计，即便是常温的热振动能量都比它大得多。

引力的发展相对简单：牛顿提出引力形式，爱因斯坦揭示其源于时空结构的本质。

一般来说，不同的物理理论应用范围大不相同，量子理论适用微观结构，广义相对论更合适宇宙，热力学与统计物理适用于多粒子系统，这从理论的常数可以略见一斑。譬如，量子理论中的极小的普朗克常量，广义相对论中不可超越的光速，热力学与统计物理中的玻尔兹曼常数和阿佛加德罗常数，从这点看来，牛顿的理论似乎并不成熟，因为其中并无一常数。有人认为可以将万有引力公式中的 G 作为常数，但实际上它可以被后继的更深刻的理论推导出来。

虽然量子理论与广义相对论都获得了极大的成功，他们两者却比月下初次见面的恋人还羞涩，找不到共同话题。广义相对论创始人更倾向于因果论的确定性的宇宙存在方式，而非量子力学预言的非确定性的、分立的世界。这样的分歧本质上表现在引力相互作用与其他力相互作用的难以调和上。

我们知道，引力的强度远小于其他相互作用力，甚至只有弱相互作用的 10^{-34} ，这就是著名的“层次问题”。但物理学家相信，四种力在宇宙初期没有区别，各个力的力程、大小以及与其他力的相互作用都一样，但是随着宇宙温度的不断降低，对称破缺相继产生。同时，与此相反，物理学家不断地提出理论，希望将其统一。20 世纪 60 年代，物理学家斯蒂芬·



温伯格和阿卜杜勒·萨拉姆发展了电磁力和弱力的统一的解释，即著名的弱电模型；随着 QCD 的成功，强力也得到了很好的解释，引力仿佛被人遗忘到了角落，因为它太不合群。可以说，本书本质上讲述的便是人们统一引力的努力尝试，从卡鲁扎-克莱恩理论，到超引力和超弦理论，再到最近的膜理论和 M 理论，一场波澜壮阔的物理学的统一史。

科学与宗教

哲学原意为“爱智慧”，那么我们可以类似地称呼科学为“爱自然”，宗教为“爱上帝”。“爱自然”的科学，藉由人类的智慧，洞悉由微观至宏观的万事万物，她更多的得益于近代文明的发展，以微不足道的肉体之身，打造出可以洞彻四方的思想之神；她在另一个“空间”，无形的思想空间挽回了卑微存在于物质空间的人类的颜面。在这场知识的追求过程中，人类非常矛盾，若划一个圆，其面积代表我们已经获得的知识，圆外为无限的未知，那么圆周就是我们的未知领域；这样，随着核心知识和理解力的增长，意味着我们知识之环与外界接触的地方同样变大，亦增加了知识却平添了更多的无知，多么讽刺！为何我们依然孜孜不倦——虽然未知不断增长，我们的内心却变得越发踏实，毕竟我们不再是高傲的小点，我们知道自身的局限，理解我们的渺小——还有那么多的未知世界等待探索。这是科学的力量，科学让人类更加自信地生活在当下，而不是浑浑噩噩地生活在毫无关联的过去和未来。

有一些人喜欢将科学宗教化，以为宗教是科学的归宿，并

以牛顿和爱因斯坦打比方，声称他们毕生研究自然科学，晚年“返朴归真”皈依宗教。这是人们一厢情愿的误解，其实科学与宗教的鸿沟比人们想象得要大得多。误解的原因有二，一方面，人们自古以来都有将伟人神化的倾向，想想东西方传说神话中的英雄们，神人们，如果他们确确实实存在过，也不过是智者或者能人；将其带上宗教的光环，似乎他们便成为神的代言人，难怪他们能做出惊世骇俗的功业。另一方面，科学作为认知和实践的学科，其精髓还未深入人心；科学精神即怀疑，实证的精神，是建立在真真切切实验和逻辑推理的基础上的，容不得半点虚妄，大凡弄虚作假的科学成果终究经不起时间的检验。科学带给我们更多的是客观知识，而非宗教般精神上的慰藉。回到牛顿和爱因斯坦的例子，牛顿虽有杰出的科学成果，但本人的品性有待考证，他那个时代的宗教本身和哲学、自然科学密不可分，他与宗教的关系和科学无关。而爱因斯坦的一些言论比如“上帝不掷骰子”之类，也与宗教无干系。爱因斯坦信仰的不是“三位一体”的基督教，他信仰的是“自然的宗教”，爱因斯坦所谓的上帝乃是神奇的“自然运行法则”，更进一步地说，是“他心目中的自然的运行法则”；所以，当学术生涯后期进行统一场论，研究助手把模型给他审阅时，他会给出“如果我是上帝，我会……”之类的评价^①——当然，他的上帝与真善美无关，只与物质、时空、电磁力、电子的分立能级有关。

同科学一样，迷信也在与时俱进。它会找到科学理论中最玄奥之处借以发挥；披上科学的外衣，如果能再拉上一两位所

^① 见本书第八章



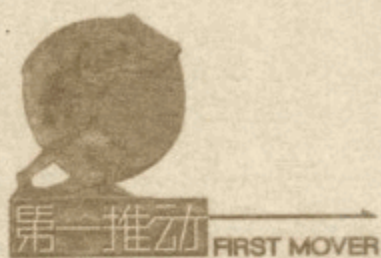
谓的科学家助阵，在大众之间流行起来简直轻而易举。所以，某些时候，科学家并不能一味地埋头发展理论，应该腾出更多的时间，把正确的概念，基本常识传递给公众。当然，这也是出版社编辑此套丛书的重要目的。

以上是译者在翻译过程中，一些疏浅的想法。整本书的翻译历时两年有余，译者虽尽力还其原貌，但可能还存在错漏之处，希望各位读者不吝指正。最后，引用古罗马新斯多葛派哲学家 Epictetus 的话与大家共勉：

人有这些东西可以思索，而且看得见太阳、月亮和星星，欣赏土地和海洋，他不是孤单的，甚至也不是一筹莫展的。

译者

2008 年 4 月



“一本不可思议的书——非常清晰明了，非常具有可读性。从《平地》到超弦，它对高维物理和数学进行了卓越的介绍。充满了迷人的历史述事和趣闻轶事是它最出类拔萃之处。我无比的喜欢它。”

—— Ian Stewart, 《二维国内外》的作者

“本书是从柏拉图的洞穴到人类思想和科学知识最遥远之处的非凡旅途。这本令人难以置信的书引领读者梦见超空间景致，追逐光波，探索克莱因的量子奥德赛和卡鲁扎的蜚，在平行宇宙间欢跃，攫取道德与宇宙最精华之处。买下这本书来犒劳你的头脑吧。”

—— Clifford Pickover, 《数学之恋》的作者

“哈尔彭用困惑的眼睛审视当今物理学中最疯狂的观点。他领着我们来到那些探索古怪想法的人们的个人世界，迷人而富于启迪。”

—— Gregory Benford, 《基本的恐惧》的作者

“对当代物理让人鼓舞的精心展示。这本书可媲美布赖恩·格林的《宇宙的琴弦》以及他近期出版的《宇宙经纬》，这本书同样值得充满好奇心、喜好思考的非专业人士广泛阅读。”

—— E. Sheldon教授, 《当代物理》

上架建议：科普类

ISBN 978-7-5357-5159-1



9 787535 751591 >

定价：32.00 元